תוכן העניינים

פרק 6: קבלים 9

6.1 הקבל

6.2 הגדרת הקיבול של קבל

6.3 חישוב הקיבול של קבל לוחות מקבילים

6.4 צירוף קבלים- חיבור קבלים במקביל

6.5 צירוף קבלים- חיבור קבלים בטור

6.6 צירוף קבלים מעונים

6.7 האנרגיה האגורה בקבל מתן

6.8 הכנסת חומר מבודד בין לוחות קבל

6.9 מתינת קבל ופריקתו

תרגילים 51

פרק 7: השדה המגנטי 61

7.1 הקדמה

7.2 תכונות השדה המגנטי

7.3 השדה המגנטי של מספר מגנטים

7.4 הכוח שפועל על מטען חשמלי בשדה מגנטי

7.5 יחידת השדה המגנטי

7.6 תנועת מטען בשדה מגנטי אחיד

7.7 יישומים של תנועת מטענים חשמליים בשדה מגנטי

7.8 הכוח שמפעיל שדה מגנטי על זרם

7.9 מיקרון פעולה של מכשירים למדידת עוצמת הזרם החשמלי

7.10 מיקרון הפעולה של מנוע חשמלי

7.11 מיקרון הפעולה של רמקול

תרגילים 99

פרק 8: מקורות שדה מגנטי 108

8.1 יצירת שדה מגנטי מ"י זרם חשמלי

8.2 הכוח המגנטי בין שני זרמים מקבילים

8.3 הגדרת האמפר בשיטת היחידות SI

8.4 השדה המגנטי של סליל דק ושל סילונית

8.5 מיקרון הסופרפוזיציה של שדות מגנטיים

8.6 הכתיבה המיתמית של חוק ביו וסבר- הרחבה

8.7 חוק אמפר

תרגילים..... 129

פרק 9: השראה אלקטרומגנטית..... 136

9.1 השראה אלקטרומגנטית- הצגת התופעה

9.2 יצירת כא"מ בישרה בעזרת הנע בשדה מגנטי אחיד

9.3 חוק פארדיי

9.4 חוק לנץ

9.5 גנראטורים ומנועים

9.6 שנאי והובלת אנרגיה חשמלית למרחקים

9.7 השראה מגנטית- יישומים נוספים

9.8 זרמי מערבולת

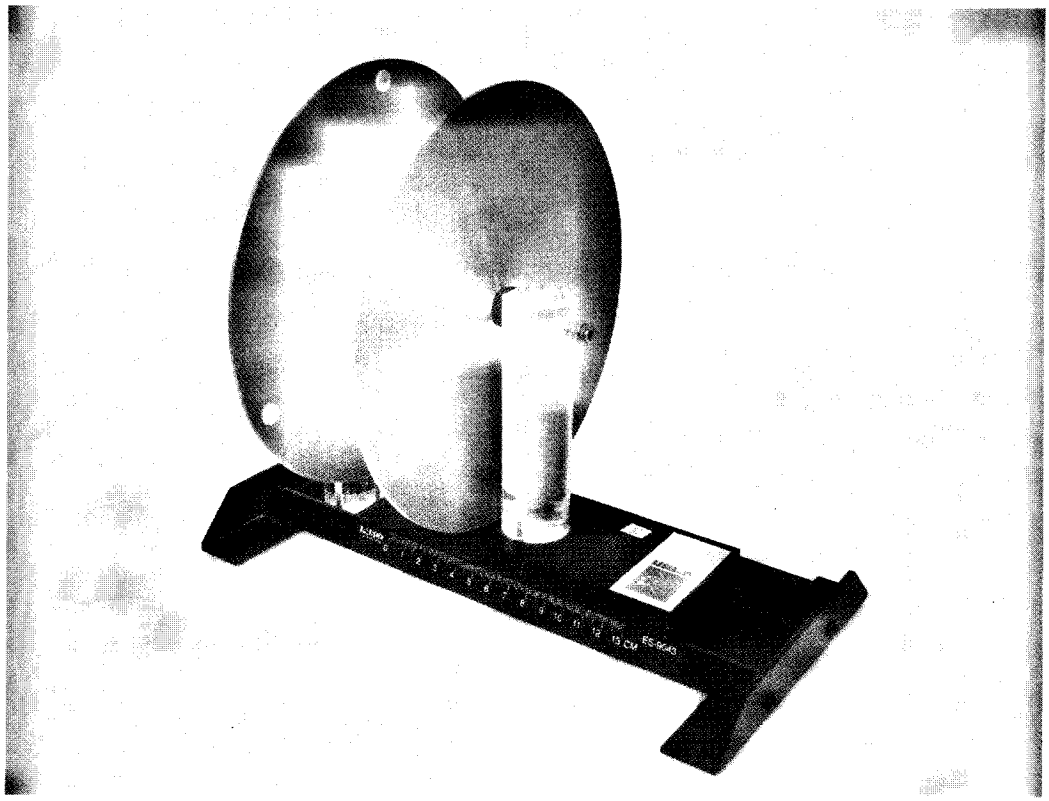
תרגילים..... 173

פרק 6 - קבלים

אפשר לאגור אנרגיה מכנית, למשל על ידי כך שמעלים מים לראש הר או על ידי כך שמותחים קפיץ.

הקבל הוא רכיב חשמלי שבו אפשר לאגור אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

השימוש בקבלים נרחב ביותר: לב ליבו של המבזק במצלמה הוא קבל שמטענו נפרק בזמן קצר. הקבל הוא גם מרכיב חשוב במכשירי רדיו וטלוויזיה, ולמעשה, בכל מכשירי הקשר האלחוטיים. בנוסף, הקבל הוא מרכיב הכרחי במערכת ההצתה במנוע המכונית, ויש לו חשיבות רבה במעגלי זרם חילופין, ונעשה בו שימוש נרחב ומגוון באלקטרוניקה. בשבבים זעירים של מעבדי המחשבים האישיים מצויים אלפי רכיבים המתפקדים כקבלים.



איור 1 - בתצלום קבל לוחות משתנה המשמש ללימוד במעבדה.

6.1 הקבל

הקבל הוא זוג מוליכים מופרדים על ידי חומר מבודד. כפי שיוסבר בהמשך, קבל נטען כך שמטען כל אחד משני המוליכים זהה, אך מנוגד בסימנו. מסיבה זו, המטען הכולל על קבל הוא תמיד אפס. בהמשך משמעות האמירה "מטען הקבל" תהיה המטען q שעל פני אחד המוליכים, ומטעמי נוחות יהיה זה המטען על המוליך החיובי.

הקבל הוא רכיב במעגל החשמלי שמסוגל לאגור אנרגיה פוטנציאלית חשמלית המתלווה לכל קבוצת מטענים. יכולת זו, כפי שיתברר, תלויה בגאומטריה של הקבל, כלומר במידותיו ובצורתו, ובחומר המבודד שמפריד בין המוליכים. הקבל הוא גם האמצעי ליצור שדות חשמליים כולל יצירת שדה חשמלי אחיד. השדה החשמלי האחיד משמש, בין היתר, במכשירי חשמל בהם יש צורך לשלוט על מסלול תנועתם של חלקיקים טעונים.

הקבל יוצג כאן בשני רבדים:

* בחלק הראשון של הדיון נדון **במצב "הסטציונרי"- זהו מצב עמיד, קבוע, שאין בו שינוי.** במקרה זה, הקבל טעון במטען q שאינו משתנה עם הזמן. נברר את הגורמים המשפיעים על יכולתו של הקבל להכיל מטען, כיצד יש לצרף קבלים בטור ובמקביל, ולבסוף נדון באנרגיה שנאגרת בקבל. חלק זה שייך לדיון האלקטרו-סטטי.
* בחלק השני נייחד את הדיון **לתהליך "הטרנזיאנטי"- זהו תהליך מעבר, והוא מתרחש בפרק הזמן שבו נאגר המטען בקבל או נפרק ממנו.** בתהליך הטרנזיאנטי, זרם הטעינה, או הפריקה, משנים את ערכם בכל רגע. מבחינתו של הלומד, זהו המפגש הראשון עם זרם משתנה בזמן, עניין המציב אתגר מתמטי שיוצג בפרק זה. ולבסוף, נציג את הקבל כרכיב רב חשיבות ביישומים טכנולוגיים. חלק זה משתייך לדיון האלקטרו-דינמי.

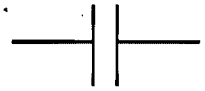
6.2 הגדרת הקיבול של קבל

"קיבול" הוא ביטוי לשוני שאחת מהגדרותיו היא "נפח, חלל שניתן לקבל בתוכו משהו".[1]

בהקשר לנושא הנלמד, הקיבול הוא גודל פיזיקלי שמציין יכולת להכיל מטען חשמלי. כאמור, הקבל עשוי זוג מוליכים מופרדים בחומר מבודד. אחד הקבלים הפשוטים ביותר הוא זוג לוחות מתכת מקבילים, המופרדים על ידי שכבת אוויר המשמשת כחומר מבודד, בדומה לקבל בתצלום

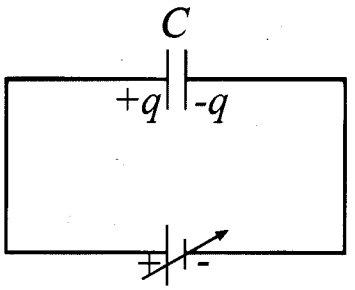
[1] המילון החדש, כרך ג' , א. אבן שושן הוצאת קרית-ספר בע"מ, ירושלים.

שבעמוד 9. בהמשך הדיון נתמקד בקבל זה מטעמים של פשטות הדיון, אף על פי שהמסקנות נכונות לכל קבל. הסימון המוסכם לקבל:



איור 2: סימון מוסכם של קבל

באיור 3 מתואר קבל לוחות מקבילים מחובר למקור מתח משתנה שיוצר הפרש פוטנציאלים V בין הלוחות. הלוח השמאלי של הקבל נטען במטען q+, והלוח הימני, שמחובר להדק השלילי של הסוללה, נטען במטען q–. בהמשך נפרט את תהליך הטעינה, שם יובהר מדוע המטענים שווים בערכם המוחלט, אך שונים בסימנם.

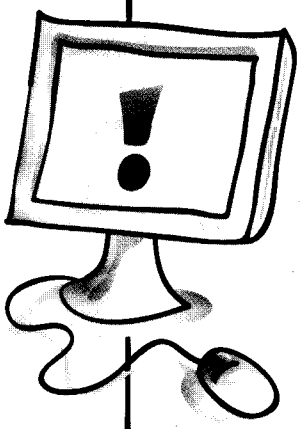


איור 3: קבל מחובר למקור מתח משתנה

ראה הדגמייה:

http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/capacitor/index.html

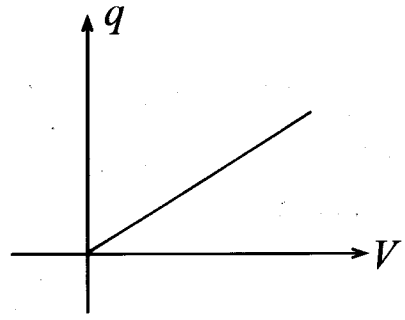
"Charging and Discharging a Capacitor"



בהדמייה שים לב לפרטים הבאים:

1. בתחילת הטעינה לוחות הקבל חסרי מטען עודף.
2. בתום הטעינה המטענים על הלוחות שוני סימן, אך כמותם שווה.
3. במשך הטעינה המטען עבר מלוח אחד אל הלוח השני דרך הסוללה.
4. כשהקבל מנותק, המטענים נשארים על הלוחות.
5. במעגל הפריקה עובר המטען דרך נגד וחוזר למצבו ההתחלתי.

כאשר מבצעים ניסוי בו מודדים ישירות את הפרש הפוטנציאלים בין לוחות הקבל ואת גודל המטען q שנאגר בקבל, מתברר שקיים יחס ישר בין שני גדלים אלה. ניתן להציג תוצאה ניסויית זו בגרף הבא:



איור 4: גרף מטען הקבל q כפונקציה של המתח V בין לוחותיו

יחס ישר זה מאפשר להגדיר את ה"קיבול".

הגדרת הקיבול של קבל לוחות:

הקיבול C הוא היחס בין גודל המטען q שעל כל אחד מהלוחות לבין המתח[2] ΔV בין הלוחות:

$$C = \frac{q}{V}$$

יחידת הקיבול היא פארד, והיא נקראת כך על שמו של פארדיי.

$$1F = \frac{1C}{1V}$$

משמעות יחידה זו: הקיבול של קבל הוא 1F, אם מטענו הוא 1C כאשר המתח בין לוחותיו 1V.

יחידת הפארד-F גדולה מאוד, לכן תת-היחידות של הפארד נפוצות מאוד.

סימון	כינוי	ערך
mF	מיליפארד	10^{-3}F
μF	מיקרופארד	10^{-6}F
nF	ננופארד	10^{-9}F
pF	פיקופארד	10^{-12}F

[2] בהמשך הפרק נסמן "V".

זהירות, מכשלה !

* הנוסחה שמגדירה את ערך הקיבול מכילה שלושה גדלים פיזיקליים: כמות המטען q, המתח בין לוחות הקבל V והקיבול C.
* הקיבול של קבל, כפי שנראה בהמשך, הוא גודל קבוע לקבל נתון.
* משמעות הדברים היא שאם המתח בין לוחות הקבל גדל, גדל גם מטען הקבל, ולהיפך, אם המתח קטן, קטן גם המטען הנאגר בקבל, אך קיבול הקבל אינו מושפע ממטענו או מהמתח בין לוחותיו.

האם קיימת דוגמה אחרת בתחום הפיזיקה שעשויה להמחיש את מושג הקיבול?
במובן מסוים, אגירת מטען בקבל דומה למתיחת קפיץ או לדחיסת אוויר לצמיג ריק של מכונית או לכדור שאינו מנופח. נתאר לעצמנו שמנפחים צמיג ריק. פעולה זו נעשית בתחנת הדלק במספר שלבים:

- מכוונים את המשאבה הדוחסת ללחץ 30 PSI[3] - אלה הוראות יצרן הצמיגים;
- מחברים את הצינור לפיית הצמיג;
- המשאבה דוחסת אוויר לצמיג, בהתחלה בקצב מהיר, אחר כך בקצב הולך וקטן, עד אשר "הצמיג מנופח", במצב זה זרם האוויר מהמשאבה לצמיג נפסק מאליו.

איור 5: צמיג הוא "קבל" שניתן לאגור בו אוויר בכמויות משתנות, לפי לחץ האוויר בו

[3] PSI - יחידת לחץ שמתאימה לכוח המופעל על ידי 1pound ליחידת שטח $1\ inch^2$.

ברר לעצמך את התשובות לשאלות הבאות:

א. מדוע זרם האוויר מהמשאבה אל הצמיג הולך וקטן?

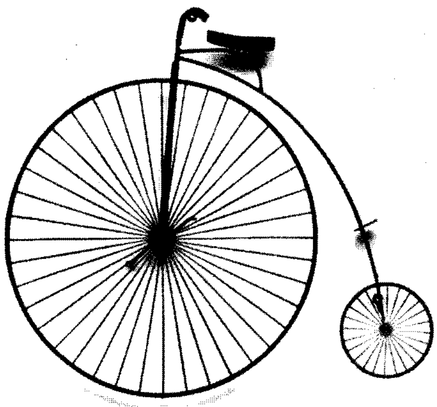
ב. מהו התנאי לכך שזרם האוויר מהמשאבה לצמיג ייפסק?

ג. מה עלינו לעשות אם ברצוננו לדחוס לתוך הצמיג מסה גדולה **יותר** של אוויר?

ד. הגדר את "הקיבול של הצמיג C" .

ה. נתאר לעצמנו 2 צמיגים: האחד קיבולו C, וצמיג שני קיבולו 2C. במה בעיקר נבדלים שני הצמיגים זה מזה?

אם תתקשה, ראה תשובות במהופך.



תשובות:

א. בתחילה, כשהצמיג היה ריק, עוצמת זרם האוויר הייתה גדולה, והיא נקבעה רק על ידי לחץ המשאבה. כשהצמיג הכיל כמות הולכת וגדלה של אוויר, נוצר לחץ נגדי בצמיג שמקשה על הזרמת אוויר מהמשאבה לצמיג.

ב. זרם האוויר ייפסק אם לחץ האוויר בצמיג משתווה ללחץ האוויר שנוצר על ידי המשאבה.

ג. יש להגדיל את הלחץ שהמשאבה יוצרת. (הנח שכל התהליך מתרחש בטמפרטורה קבועה).

ד. ניתן לבטא את קיבול הצמיג על ידי הקשר $C = m / P$, כאשר m היא מסתם של מולקולות האוויר בצמיג, ו-P הוא לחץ האוויר בצמיג. קיימות אפשרויות נוספות, אך יש להניח שהלחץ יופיע במכנה תמיד.

ה. יש להניח שנפחו או ממדיו הגיאומטריים של הצמיג יוצרים את ההבדל בין הצמיגים. לצמיג הגדול יש קיבול גדול.

6.3 חישוב הקיבול של קבל לוחות מקבילים

נסמן:

- שטח כל לוח A (למעשה, זהו שטח החפיפה של שני לוחות הקבל).
- המרחק בין הלוחות d.
- הקבל טעון, מטענו q.

בפרק 4 הדן בשדה החשמלי, מצאנו שעוצמת השדה החשמלי בין זוג לוחות מקבילים מיוצגת על ידי הביטוי:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

כאשר σ - מבטא את צפיפות המטען ליחידת שטח על כל אחד מלוחות הקבל, יחידותיו $[C/m^2]$.

ε_0 הוא קבוע המוגדר על ידי הקשר $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$.

הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות מקיים:

$$V = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d = \frac{\frac{q}{A} d}{\varepsilon_0} = \frac{qd}{\varepsilon_0 A}$$

נציב את הביטוי המגדיר את הקיבול:

$$C = \frac{q}{V}$$

$$C = \frac{q}{\frac{qd}{\varepsilon_0 A}} = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

הביטוי האחרון מתאר את הגדלים שקובעים את ערך קיבולו של קבל לוחות מקבילים:

- **הקיבול נמצא ביחס ישר לשטח הלוחות.**
- **הקיבול נמצא ביחס הפוך למרחק d שבין הלוחות.**
- **הקיבול תלוי בסוג החומר הנמצא בין לוחות הקבל. אם הלוחות נמצאים בריק או באוויר, ערכו של הקבוע הינו ε_0.**

- **מהביטוי האחרון ניתן לראות את ערכו של קבוע הפרופורציה ε_0 באופן הבא:**
- **אם בקבל המרחק בין הלוחות הוא $d = 1m$, ושטח כל לוח הוא $1m^2$, ואם בין הלוחות שורר ריק, אז קיבולו של קבל זה הוא $8.85 \cdot 10^{-12} F$.**

בהמשך נרחיב את הדיון לחומרים מבודדים נוספים שעשויים למלא את המרווח בין הלוחות.

קבל משתנה

קבל משתנה הוא רכיב חשוב במקלטי רדיו. כאשר "מחפשים תחנה" מסובבים כפתור המשנה את ערך הקיבול של קבל לוחות (או מספר קבלים מחוברים ביניהם). הקיבול תלוי בשטח חפיפת לוחותיו. הגודל A המופיע בביטויים מציין את שטח חפיפת הלוחות.

ראה הדגמה:

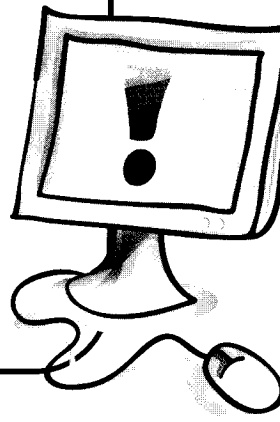
http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/varcapacitor/index.html

"Variable Capacitor"

ובאותו מקום גם:

http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/radio/index.html

"Tuning A Radio Receiver"



דוגמה 1

חשב את הקיבול של זוג לוחות מקבילים אם ידוע ששטח כל לוח $10cm^2$, והמרחק ביניהם 5mm.

פתרון:

לפי הגדרת היחידות של הקבוע ε_0, יש להציב ערכים ביחידות SI עבור ממדי הקבל, כדי שהתוצאה תתקבל ביחידות F, ולכן:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot 1.77 \cdot 10^{-12} F$$

דוגמה 2

מעוניינים לבנות קבל שקיבולו 0.1F משני לוחות מקבילים הנמצאים באוויר במרחק 1cm זה מזה. חשב את שטחו של כל לוח.

פתרון:

$$A = \frac{Cd}{\varepsilon_0} = \frac{10^{-1} \cdot 10^{-2}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 1.13 \cdot 10^{8} m^2$$

המספר שהתקבל הוא מספר עצום! אם הלוח ריבועי, אורך צלע הריבוע הוא כ-10.6 km. ברור שפתרון זה אינו אפשרי מבחינה טכנולוגית. בהמשך, בסעיף 6.8 נראה כיצד ניתן לייצור קבלים בעלי קיבול נדרש באמצעות לוחות בגודל סביר.

דוגמה 3

הקיבול של קבל לוחות הוא $1\mu F$, המרווח בין הלוחות $1cm$, והמתח ביניהם $100V$.

א. חשב את המטען על כל אחד מהלוחות.
ב. חשב את עוצמת השדה החשמלי בין הלוחות.
פתרון:
א. מהביטוי להגדרת הקיבול ניתן לרשום:

$$q = CV = 10^{-6} \cdot 100 = 10^{-4}\, C$$

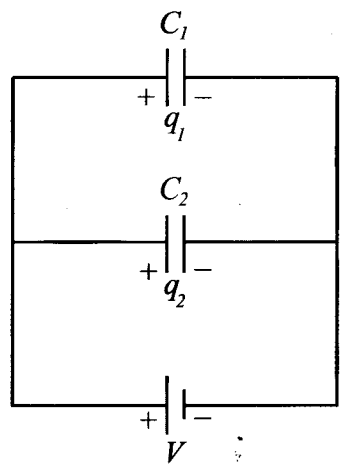
ב. עוצמת השדה החשמלי היא היחס בין המתח לבין המרווח בין הלוחות:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{100}{0.01} = 10^4 \frac{V}{m} = 10^4 \frac{N}{C}$$

6.4 צירוף קבלים - חיבור קבלים במקביל

באיור מתוארים שני קבלים C_1 ו- C_2 מחוברים במקביל למקור מתח. במעגל זה המתח על כל אחד מהקבלים זהה למתח המקור V.

$$V_1 = V_2 = V$$



איור 6: שני קבלים מחוברים במקביל למקור מתח

תהליך הטעינה והפריקה של הקבל יפורט בהמשך בסעיף 6.9. למרות זאת, משיקולים של ראיית התמונה הכוללת, נביא כאן תיאור מתומצת של תהליך הצטברות המטענים בקבל. כאשר הקבלים חוברו למעגל, הקבלים נטענו. בתהליך זה אלקטרונים נגרעו מלוח הקבל המחובר להדק החיובי של הסוללה והתווספו ללוח המחובר להדק השלילי של הסוללה. בסוף תהליך הטעינה, על הלוח הימני הצטבר מטען שלילי, ועל הלוח השמאלי הצטבר מטען חיובי.

כמות המטען על כל לוח היא q. מקור האנרגיה לפעולת הטעינה הוא בתהליך הכימי שמתרחש בסוללה. בתהליך זה מומרת אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית, וזו הופכת לאנרגיה פוטנציאלית של המטענים המופרדים בקבל. זרם המטענים במעגל נפסק עקב שוויון המתחים, כלומר המתח V בין לוחות הקבל משתווה למתח הדקי הסוללה. זהו המצב שהקבל מכיל על כל לוח את כמות המטען המרבית שסוללה זו מסוגלת לאגור בו.

למעשה, מטען חשמלי עבר מלוח אחד לשני בחוטים המוליכים המחברים את לוחות הקבל, אך יש לשים לב לכך שבמרווח שבין לוחות הקבל לא היה זרם בזמן טעינתו הודות לחומר המבודד שבין הלוחות[4].

נסמן את מטעני הקבלים ב-q_1 ו-q_2 בהתאמה. הכמות הכוללת של המטען הנאגר בקבלים היא:

$$q_{TOTAL} = q_1 + q_2$$

המטען הכולל של קבלים מחוברים במקביל הוא סכום המטען שנאגר בכל אחד מהקבלים.

עקב שוויון המתחים על הקבלים, המטען על הקבלים מקיים:

$$q_1 = C_1 V$$

$$q_2 = C_2 V$$

אפשר להחליף את שני הקבלים **בקבל שקול** יחיד- C_T שתפקידו במעגל יהיה זהה לתפקידם של שני הקבלים, כלומר הוא יכיל מטען q_{TOTAL} כאשר המתח עליו הוא V.

$$q_{TOTAL} = C_T V$$

המטען על הקבל השקול שווה בערכו לסכום המטענים של הקבלים, לכן:

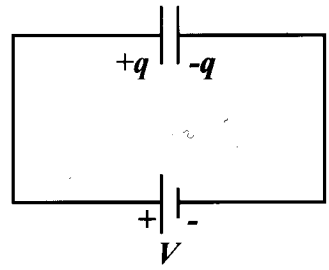
$$C_T V = C_1 V + C_2 V$$

ומכאן מתקבל הביטוי לקיבולו של הקבל השקול:

$$C_T = C_1 + C_2$$

[4] החומר המבודד לעתים יהיה ריק או אוויר, בהמשך נתייחס לחומרים מבודדים נוספים.

$$C_T = C_1 + C_2$$



איור 7: הקבל השקול לקבלים C_1 ו-C_2 המחוברים במקביל למקור מתח

ובהכללה, עבור n קבלים מחוברים במקביל מתקבל:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n$$

אם הקבלים זהים מתקבל:

$$C_T = nC$$

סיכום חיבור קבלים במקביל

- הקיבול השקול הוא סכום כל אחד מקיבולי הקבלים שחוברו במקביל, לכן הקיבול השקול גדול מהקיבול של כל קבל יחיד במערך הקבלים.
- המתח על כל הקבלים זהה.
- המטען על הקבלים שחוברו במקביל נמצא ביחס ישר לקיבול, כלומר:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

דוגמה 4

שני קבלים שקיבולם $C_1 = 2\mu F$ ו $C_2 = 4\mu F$ מחוברים במקביל למקור מתח של 12V.

א. חשב את מטענו של כל קבל.

ב. חשב את קיבולו של הקבל השקול, את המתח עליו ואת מטענו.

פתרון:

א. המטענים על הקבלים הם:

$$q_1 = C_1 V = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 24\mu C$$

$$q_2 = C_2 V = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 48\mu C$$

ב. ערך הקיבול השקול הוא:

$$C_T = C_1 + C_2 = 6\mu F$$

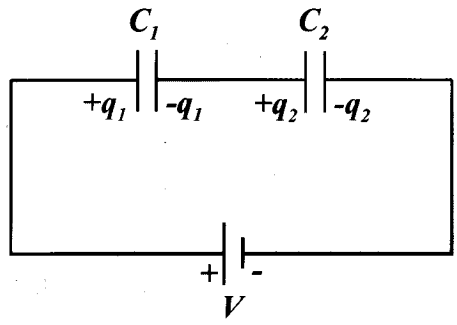
המתח על הקבל השקול זהה למתח על כל אחד מהקבלים, 12V.

המטען על הקבל השקול הוא:

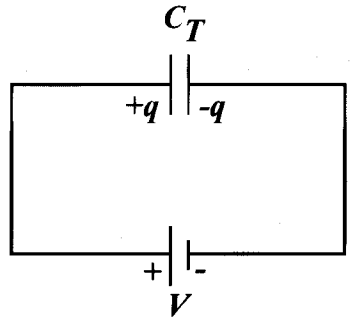
$$q_T = q_1 + q_2 = 72\mu C$$

6.5 צרוף קבלים - חיבור קבלים בטור

באיור 8 משורטט מעגל חשמלי הכולל סוללה וזוג קבלים המחוברים בטור, ובאיור 9 משורטט המעגל השקול.



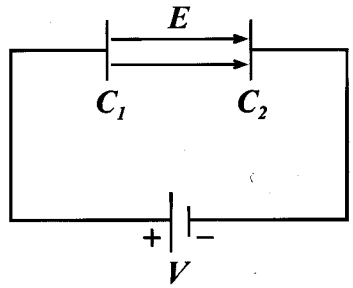
איור 8: שני קבלים מחוברים בטור למקור מתח



איור 9: המעגל השקול של המערך באיור 8

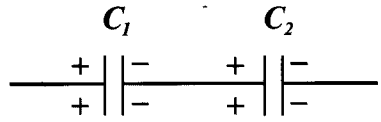
במקרה זה, הלוח השמאלי של הקבל C_1 מחובר להדק החיובי של סוללה, והלוח הימני של הקבל C_2 מחובר להדק השלילי של הסוללה. שני הלוחות האחרים, הפנימיים, של הקבלים מחוברים ביניהם, אך הם מנותקים ממקור המתח. כתוצאה מכך מטענם הכולל יהיה אפס גם בסוף תהליך הטעינה, כפי שהיה בתחילה, בעת שצורפו למעגל. נעקוב אחר טעינת הקבלים מרגע סגירת המעגל, כאשר לוחות הקבלים ריקים ממטען עודף, עד אשר מסתיים תהליך הטעינה:

- עם סגירת המעגל נוצר הפרש פוטנציאלים בין לוחות הקבל, והתוצאה - אלקטרונים עוברים מהלוח השמאלי של C_1 ללוח הימני של C_2 דרך הסוללה, עד שהפרש הפוטנציאלים בין לוחות אלה משתווה למתח הסוללה. הלוח השמאלי של C_1 נטען במטען $+q$, והלוח הימני של C_2 נטען במטען $-q$.
- בין שני הלוחות הללו נוצר שדה חשמלי שכיוונו ימינה: מהלוח השמאלי של C_1 אל הלוח הימני של הקבל C_2.



איור 10: שני הלוחות החיצוניים המכילים מטענים יוצרים שדה חשמלי המכוון ימינה. בלוחות הפנימיים המצויים בשדה חשמלי זה נוצר קיטוב, והם נטענים במטענים מנוגדי סימן.

- שני הלוחות הפנימיים - הלוח הימני של C_1 והלוח השמאלי של C_2 - אינם מחוברים לסוללה, אך הם מחוברים ביניהם, וכך הם מהווים גוף מוליך אחד. הם נמצאים עתה בשדה החשמלי שנוצר על ידי הלוחות החיצוניים.
- כתוצאה מהשדה החשמלי, נוצרת הפרדת מטענים בין הלוחות הפנימיים: הלוח הימני של C_1 נטען במטען $-q$, והלוח השמאלי של C_2 נטען במטען $+q$.
- בתום הטעינה, הלוחות השמאליים בשני הקבלים נושאים מטען $+q$, והלוחות הימניים נושאים מטען $-q$, כמתואר באיור 11.



איור 11: סימני המטענים בתום תהליך הטעינה.

המטען על קבלים מחוברים בטור, זהה על כל אחד מהקבלים.
המתח הכולל על מערך קבלים מחוברים בטור הוא סכום המתחים שעל כל אחד מהקבלים, לכן:

$$V = V_1 + V_2$$

נחשב את קיבולו של קבל שקול יחיד, שעשוי להחליף את זוג הקבלים, כך שהשפעתו במעגל תהיה כהשפעתם של שני הקבלים הנתונים.
הדרישה מהקבל השקול היא:
המטען על לוחותיו יהיה $+q$ על לוח אחד ו $-q$ על הלוח האחר כאשר המתח עליו הוא V.

המתח על כל קבל בנפרד:

$$V_1 = \frac{q}{C_1}$$

$$V_2 = \frac{q}{C_2}$$

המתח הכולל:

$$V = q \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{q}{C_T}$$

אם נחלק את המשוואה במטען q, נקבל:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

ובהכללה, עבור מספר כלשהו n, של קבלים מחוברים בטור:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots\ldots + \frac{1}{C_n}$$

הקיבול השקול ל – n קבלים זהים C מחוברים בטור:

$$C_T = \frac{C}{n}$$

סיכום חיבור קבלים בטור:

- ערך הקיבול השקול קטן תמיד מערכו של הקיבול של כל קבל יחיד במערך הקבלים.
- המטען על כל קבל זהה, והוא שווה בערכו למטען על הקבל השקול.
- משוויון המטענים על הקבלים נובע שהמתחים על שני קבלים בטור נמצאים ביחס הפוך לערכי הקיבול, כלומר:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

דוגמה 5

שני קבלים שקיבוליהם $C_1 = 2\mu F$ ו- $C_2 = 4\mu F$ מחוברים בטור למקור מתח של 12V.

א. חשב את המטען של כל קבל.

ב. חשב את המתח על כל קבל.

פתרון:

א. נחשב תחילה את ערך הקיבול השקול.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$$

$$C_T = \frac{4}{3}\mu F$$

המטען על הקבל השקול הוא:

$$q = C_T V = \frac{4}{3}\mu F \cdot 12V = 16\mu C = 1.6 \cdot 10^{-5} C$$

ערך זה מציין גם את המטען על כל אחד מהקבלים.

ב. את המתח על כל קבל נוכל לחשב מהקשר:

$$V = \frac{q}{C}$$

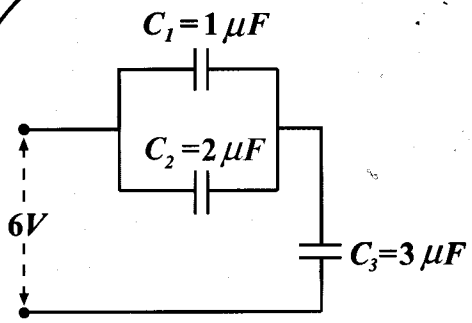
$$V_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{1.6 \cdot 10^{-5} C}{2 \cdot 10^{-6} F} = 8 Volt$$

את המתח על הקבל השני אפשר למצוא באופן דומה, או מסכום המתחים במעגל. נציג את האפשרות השנייה:

$$V = V_1 + V_2 = 12 \ Volt$$

$$V_2 = 12 - 8 = 4 \ Volt$$

דוגמה 6



איור 12: מערך הקבלים

א. חשב את הקיבול השקול של המערכת.

ב. חשב את המטען ואת המתח על כל קבל.

פתרון:

א. תחילה יש לחבר את הקבלים המקבילים. נכנה את השקול שלהם C_{1+2}:

$$C_{1+2} = 1\mu F + 2\mu F = 3\mu F$$

הקבל השלישי מחובר בטור לשניים הראשונים; נסמן C_T את השקול של שלושת הקבלים:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = \frac{2}{3}\frac{1}{\mu F}$$

$$C_T = 1.5\,\mu F$$

אפשר גם לחשב על פי:

$$C_T = \frac{3\mu F}{2} = 1.5\mu F$$

ב. המטען על הקבל השקול, ועל C_3 הוא:

$$q_T = C_T V = 1.5 \cdot 10^{-6} F \cdot 6V = 9 \cdot 10^{-6}\ C$$

נמצא את המתח על C_3 :

$$V_3 = \frac{q_3}{C_3} = \frac{9 \cdot 10^{-6} C}{3 \cdot 10^{-6} F} = 3\,Volt$$

מכאן שגם המתח של זוג הקבלים שבמקביל הוא 3Volt.

עתה נחשב את המטען של כל אחד מהקבלים C_1 ו C_2:

$$q_1 = C_1 V_1 = 10^{-6} F \cdot 3V = 3 \cdot 10^{-6}\ C$$

$$q_2 = C_2 V_2 = 2 \cdot 10^{-6} F \cdot 3V = 6 \cdot 10^{-6}\ C$$

נקודה להדגשה

- העקרונות שהודגמו בדוגמאות 4-6 הם כלליים, הבנתם מאפשרת לחשב את הקיבול השקול, את המטען ואת המתח על כל קבל ברשת קבלים סבוכה.

ראה הדגמייה:

הנושא: גורמים המשפיעים על הקיבול

http://micro.magnet.fsu.edu\electromag\java\capacitance\index.html

"Factors Affecting Capacitance"

בהדמיה בדוק:

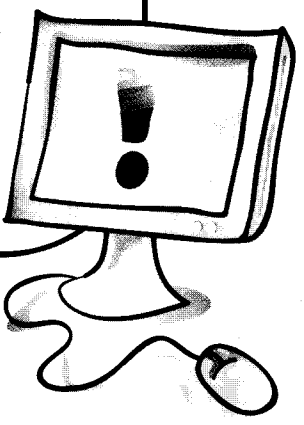
1. מהו ערך הקיבול הקטן ביותר בהדמיה זו?
2. פי כמה גדל הקיבול של קבל אוויר אם מכניסים בין לוחותיו נייר?
3. מהו ערך הקיבול הגדול ביותר בהדמיה זו?

הנושא: קבל בטבע – **כיצד** נוצר הברק?

http://micro.magnet.fsu.edu\electromag\java\lightning\index.html

"Lightning"

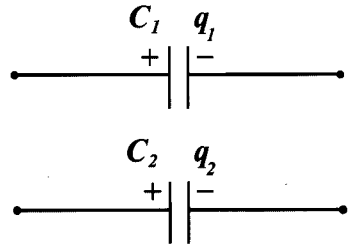
מעבר למתח מסוים הקבל "נפרץ", והקבל "מאבד את מטענו".



6.6 צרוף קבלים טעונים

בסעיף זה נדון בשני קבלים שחוברו תחילה למערכת טעינה נפרדת, ושניהם נותקו ממנה כאשר הם טעונים. לאחר מכן הקבלים הטעונים חוברו ביניהם, ואנו נרצה לברר כיצד מתארגן מחדש המטען על הקבלים. העקרונות שנלמדו עד כה מאפשרים להתמודד עם בעיה זו, על כן נזכיר אותם בקצרה בלבד:

נניח שהקבל C_1 מכיל מטען q_1, ומטענו של קבל שני C_2 הוא q_2.



איור 13: הקבלים C_1 ו-C_2, נטענו ונותקו ממקור המתח

אם מחברים שני קבלים אלה, לוח חיובי עם לוח חיובי, המטענים יתפלגו מחדש בין שני הקבלים על פי העקרונות הבאים:

$q_1^* + q_2^* = q_1 + q_2$ משוואה זו מייצגת את חוק שימור המטען.

$V_1^* = V_2^* = \frac{q_1^*}{C_1} = \frac{q_2^*}{C_2}$ משוואה זו מציינת את העובדה שהמתח בין לוחות הקבלים לאחר שחוברו יחד זהה.

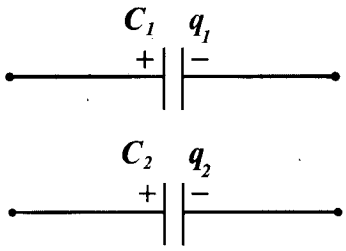
זהירות, מכשלה !

הגדלים שנשמרים הם סכום המטענים וקיבולו של כל אחד מהקבלים, אך המתח החדש V_1^* שונה מהמתח V_1 ומהמתח V_2.

דוגמה 7

נתאר לעצמנו שני קבלים שנותקו זה עתה מתוך מעגל חשמלי, על כן הם טעונים.
מטען קבל אחד הוא $q_1 = 6\mu C$, וקיבולו $C_1 = 2\mu F$;
מטען הקבל השני הוא $q_2 = 2\mu C$, וקיבולו $C_2 = 4\mu F$;

חשב את המתח והמטען על כל אחד מהקבלים אם:
א. נחבר את שני הקבלים, לוח חיובי של האחד עם לוח חיובי של השני.
ב. נחבר את שני הקבלים, לוח חיובי של האחד עם לוח שלילי של השני.



איור 14: הקבלים C_1 ו- C_2 נטענו ונותקו ממקור המתח.

פתרון:
א. עם סגירת המתגים, שני הקבלים מחוברים במקביל. לוחות שווי סימן חוברו יחד, מטענם הכולל לאחר החיבור $q = q_1 + q_2$, כך שמטען חיובי בשיעור $8\mu C$ יתפלג בין שני הלוחות החיוביים, ומטען $-8\mu C$ יתפלג בין הלוחות השליליים:

$$q_1^* + q_2^* = q_1 + q_2 = 8\ \mu C$$

כאמור, מתח שני הקבלים שווה:

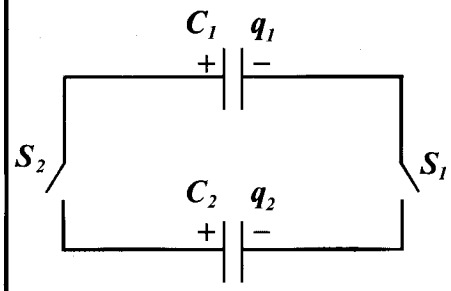
$$V_1^* = V_2^* = \frac{q_1^*}{C_1} = \frac{q_2^*}{C_2} = \frac{q_1^*}{2} + \frac{q_2^*}{4}$$

פתרון המשוואות מניב את התוצאות הבאות:

$$q_1^* = 2\frac{2}{3}\mu C$$

$$q_2^* = 5\frac{1}{3}\mu C$$

$$V^* = 1\frac{1}{3} Volt$$



איור 15: הקבלים הטעונים מחוברים זה לזה, קוטב חיובי עם קוטב חיובי ושלילי עם שלילי

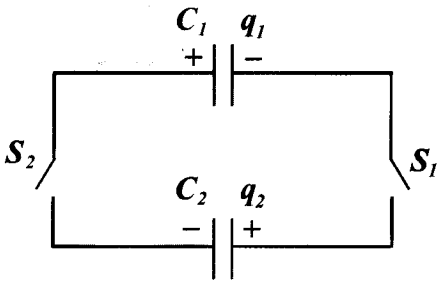
דוגמה 7 - המשך

ב. גם במקרה שהקבלים חוברו בקוטביות נגדית, שני הקבלים מחוברים במקביל.
המטען העודף שיתפלג בין הקבלים יהיה:

$$q = q_1 + (-q_2) = 4\mu C$$

הקיבול השקול הוא $6\mu F$, לכן המתח המשותף על הקבלים הוא:

$$V^* = \frac{q}{C_T} = \frac{4\mu C}{6\mu F} = \frac{2}{3} Volt$$



איור 16: הקבלים הטעונים מחוברים זה לזה, קוטב חיובי עם קוטב שלילי

והמטענים של הקבלים יהיו:

$$q^*_1 = C_1 V^* = 2\mu F \cdot \frac{2}{3} V = \frac{4}{3}\mu C = 1.33\mu C$$

$$q^*_2 = C_2 V^* = 4\mu F \cdot \frac{2}{3} V = \frac{8}{3}\mu C = 2.67\mu C$$

ובהכללה:

כאשר מחברים זה לזה שני קבלים טעונים שנותקו ממקור המתח,
אם חוברו הדקים שווי סימן :

$q_1^* + q_2^* = q_1 + q_2$ המשוואה מבטאת את שימור המטען.

$V_1^* = V_2^* = \frac{q_1^*}{C_1} = \frac{q_2^*}{C_2}$ המשוואה מבטאת את שוויון המתחים על הקבלים.

אם חוברו הדקים שוני סימן, על סמך אותם שיקולים מתקבלות המשוואות הבאות:

$$q_1^* + q_2^* = q_1 - q_2$$

$$V_1^* = V_2^* = \frac{q_1^*}{C_1} = \frac{q_2^*}{C_2}$$

6.7 האנרגיה האגורה בקבל עיון

כדי לדחוס אוויר לצמיג המכונית או כדי למתוח קפיץ, יש לבצע עבודה. בשני המקרים, כתוצאה מעבודה זו, מועברת אנרגיה, ונאגרת בצמיג המנופח או בקפיץ המתוח. בעת טעינת הקבל, נאגרת בו אנרגיה פוטנציאלית חשמלית שהיא תוצאה של "דחיסת המטענים" בקבל.

כאשר "מקצרים" קבל, כלומר מחברים ישירות את לוחותיו בתייל מוליך, נפרק המטען כהרף עין, ובדרך כלל נוצר ניצוץ. המטענים נאגרים בקבל הודות לסוללה חשמלית, שמעבירה אלקטרונים מהלוח החיובי אל הלוח השלילי, ובתום התהליך המטען על כל לוח מגיע לערכו הסופי q_f. נתאר כאן תהליך שונה במקצת: נניח שאנו מעבירים מלוח ללוח מטען בצעדים בדידים, כל פעם מנה זעירה של מטען Δq.

אם על הקבל הצטבר כבר מטען q, הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות הוא:

$$V = \frac{q}{C}$$

ניתן להניח שבמהלך העברת מנה זעירה של מטען Δq המתח בין לוחות הקבל אינו משתנה, ונשאר כפי שהיה בתחילת המעבר. לכן לצורך העברת המנה הבאה של מטען Δq מלוח אחד לשני, הסוללה מבצעת עבודה זעירה בשיעור:

$$\Delta W = V \cdot \Delta q = \frac{q}{C} \cdot \Delta q$$

נחזור על צעד זה של העברת מטען Δq עד שהקבל מכיל מטען q_f, והמתח עליו V_f.

אפשר להתייחס לטעינת הקבל כאילו כל המטען q שהצטבר בו הובא לקבל כאשר המתח בין הלוחות היה קבוע ושווה למתח הממוצע במשך תהליך הטעינה. מתח זה הוא:

$$V_{AVERAGE} = \frac{V_0 + V_f}{2} = \frac{V_f}{2}$$

כאשר V_f מציין את המתח הסופי בין לוחות הקבל, בתום הטעינה. המתח ההתחלתי, V_0, בתחילת הטעינה היה אפס כי הקבל לא הכיל מטען עודף. מכאן שהעבודה הדרושה לאגירת המטען בקבל היא[5]:

$$W = q\frac{V_f}{2}$$

---

[5] למעשה, אגירת המטען בקבל מתבצעת באמצעות סוללה ונגד. כפי שנראה בהמשך, 50% מאנרגית הסוללה מתבזבזת בנגד.

כאשר q מייצג את המטען בתום הטעינה.

עבודה זו הפכה לאנרגיה פוטנציאלית בקבל. ניתן לבטא את אנרגיית הקבל באמצעות ביטויים אלה:

$$U = q\frac{V_f}{2} = \frac{CV^2{}_f}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

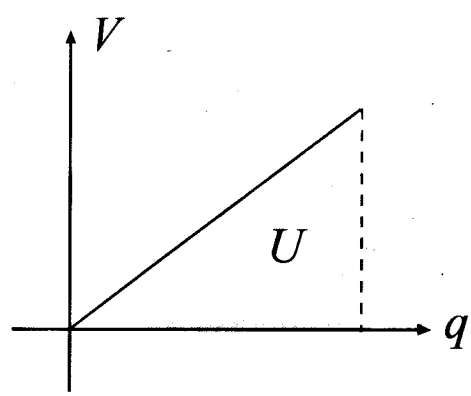
ניתן להגיע לביטוי זה באמצעות חשבון אינטגרלי באופן הבא:

$$W = \int_0^{q_f} \frac{q}{C} dq = \frac{1}{C}\frac{(q_f)^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

הגרף הבא מתאר את תלות המתח בין לוחות הקבל במטען שכבר נאגר בקבל. גרף זה מקיים את הקשר

$$V = \frac{1}{C}q$$

לכן שיפועו-1/C. השטח בין הגרף לבין הציר האופקי מייצג את האנרגיה האגורה בקבל.



איור 17: גרף המתח בין לוחות קבל כפונקציה של מטען הקבל

לקבל נתון, האנרגיה האגורה בו גדלה עם גידול המטען שנאגר בו. באופן מעשי, יש גבול עליון למתח המרבי לאגירת מטען בקבל. מעבר לגבול זה הקבל "נפרץ", והמטען מתפרק ישירות דרך הלוחות.

דוגמה 8

א. חשב את האנרגיה האגורה בקבל $C = 8\mu F$ שחובר לסוללה $\varepsilon = 6V$, בהנחה שהקבל נטען לחלוטין.

ב. חשב את כמות המטען שעברה דרך הסוללה בעת הטעינה.

פתרון:

א. $$U = \frac{1}{2}CV_f^{\,2} = \frac{1}{2}8\cdot 10^{-6}F\cdot(6V)^2 = 1.44\cdot 10^{-4}\,J$$

ב. המטען שעבר דרך סוללה שווה בערכו למטען על אחד מלוחות הקבל, לכן:

$$q = CV_f = 8\cdot 10^{-6}F\cdot 6V = 4.8\cdot 10^{-5}C$$

6.8 הכנסת חומר מבודד בין לוחות קבל

נתאר לעצמנו קבל לוחות טעון במטען q_0, המתח בין הלוחות הוא V_0, וקיבולו $C_0 = \frac{q_0}{V_0}$.

השדה החשמלי בין לוחות הקבל הוא אחיד. עוצמת השדה החשמלי E_0, וכיוונו מהלוח החיובי אל הלוח השלילי.

איור 18: הכנסת חומר מבודד בין לוחותיו של קבל טעון מקטינה את המתח בין לוחות הקבל

אחרי שמנתקים את הקבל ממקור המתח, מכניסים חומר מבודד בין לוחותיו. מתברר שהמתח בין הלוחות קטן, וערכו במצב החדש $V < V_0$. מאחר שהמטען על הלוחות נשאר קבוע, נסיק את המסקנה שהחומר המבודד גרם להגדלת הקיבול לערך חדש, $C > C_0$.

כזכור, הקיבול תלוי בממדי הקבל:

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

בנוסחה זו ε_0 מבטא את תכונות הריק (או, בקירוב טוב, של האוויר) כחומר מבודד. הכנסת חומר מבודד אחר מגדילה את ערכו של קבוע הפרופורציה המקשר את ערך הקיבול C, עם ממדי הקבל A/d, לערך חדש $\varepsilon > \varepsilon_0$.

מקובל לרשום את הקיבול של קבל המכיל חומר מבודד באופן הבא:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

כאשר:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

ε_0 נקרא קבוע הדיאלקטרי של הריק.

ε_r נקרא קבוע דיאלקטרי יחסי. ε_r הוא מספר טהור, והוא מבטא פי כמה גדל ערך הקיבול עם הכנסת המבודד בין לוחות הקבל, כלומר:

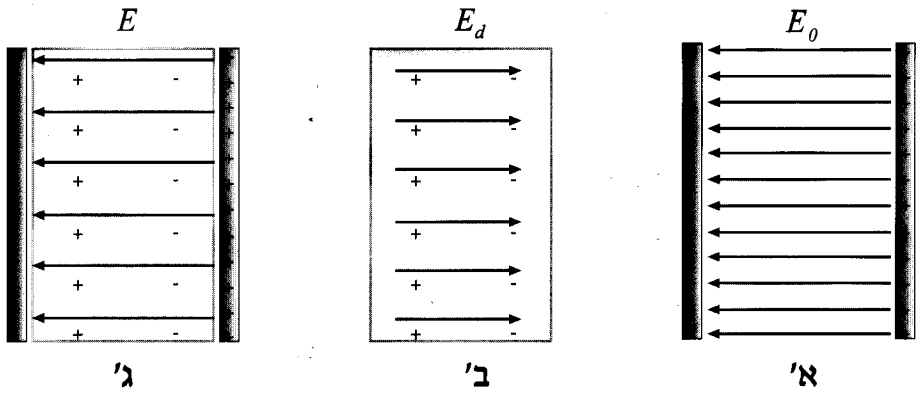
$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

נציג ערכי ε_r של חומרים מבדדים אחדים:

החומר	ערך ε_r
זכוכית[6]	5
נייר	3.7
ניילון	3.4
מים	80.5

החומר המבודד שהוכנס בין לוחותיו של קבל עובר תהליך של קיטוב-איור 19-ב', באופן שהוא יוצר שדה חשמלי $E_d < E_0$, שמגמתו מנוגדת לשדה המקורי E_0. על ידי כך עוצמת השדה השקול בין לוחות הקבל קטנה, ולכן הסכנה שהמטען יפרוץ בין הלוחות קטנה אף היא.

[6] תלוי בחומרים שמרכיבים את הזכוכית.



איור 19: איור א' עוצמת השדה $\vec{E}_0$ בין הלוחות ללא חומר מבודד

איור ב' עוצמת השדה החשמלי המושרה $\vec{E}_d$ בחומר המבודד מנוגד לכיוון $\vec{E}_0$

איור ג' עוצמת השדה בקבל המכיל חומר מבודד היא $\vec{E}_T = \vec{E}_0 + \vec{E}_d$

סיכום:

- **הוספת מבודד (חומר דיאלקטרי) לקבל לוחות מגדילה את קיבולו פי ε_r, האופייני לחומר המבודד.**
- **הוספת מבודד לקבל מאפשרת את הגדלת מתח העבודה המרבי של הקבל.**

דוגמה 9

שטח כל לוח של קבל לוחות הוא A, והמרווח בין הלוחות הוא d. הקבל מחובר למקור מתח V. בחלל שבין לוחות הקבל יש אוויר בלבד.

א. בטא בנתוני השאלה את הגדלים הבאים:

1. קיבול הקבל.
2. מטען הקבל.
3. מתח הקבל.
4. האנרגיה האגורה בקבל.

בעוד הקבל מחובר למקור המתח, מכניסים בין לוחות הקבל חומר מבודד בעל קבוע דיאלקטרי $\varepsilon_r = 2$.

ב. כיצד משפיעה הכנסת החומר המבודד על הגדלים שחישבת בסעיף א'?

פתרון:

א-1. קיבולו של הקבל ניתן על ידי הביטוי: $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$

א-2. המטען של הקבל הינו:

$$q_0 = C_0 V = \varepsilon_0 \frac{A}{d} V$$

א-3. המתח בין לוחות הקבל הינו מתח הסוללה-V.

א-4. האנרגיה האגורה בקבל היא:

$$U_0 = \frac{C_0 V^2}{2} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \cdot \frac{V^2}{2} = \varepsilon_0 \frac{AV^2}{2d}$$

ב. בסעיף זה חשוב להבין שמקור המתח (הסוללה) שומר על מתח קבוע על הקבל.

ב-1. היות שערך הקבוע הדיאלקטרי היחסי הוא 2, מתקבל:

$$C = 2C_0 = 2\varepsilon_0 \frac{A}{d},$$

כלומר עם הכנסת החומר הדיאלקטרי לתוך הקבל, קיבולו גדל פי 2 בהשוואה לקיבולו המקורי.

ב-2. $$q = 2q_0 = 2\varepsilon_0 \frac{AV}{d}$$

סיכום:

- נוח לסמן ערכים התחלתיים בסימון: d_0, C_0, V_0, q_0.
- כשמתבצע שינוי כלשהו, יש לשים לב אלו ערכים נשארים קבועים, מתח או מטען-על פי התרחיש המתואר בבעיה.
- יש לבטא ערכים חדשים באמצעות ערכים התחלתיים כגון $C = 2C_0$.
- בשיטה זו המסקנות הן מיידיות, כמו למשל $U = 2U_0$. משמעות ביטוי זה היא: האנרגיה האגורה בקבל לאחר השינוי גדולה פי 2 מערכה ההתחלתי.
- נסכם את המסקנות מדוגמאות 9 ו-10 בטבלה הבאה:

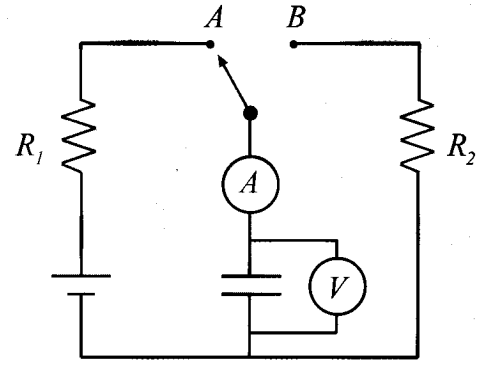
הקיבול	שינוי הקיבול מתבצע כשהקבל מחובר לסוללה		שינוי הקיבול מתבצע כאשר הקבל מנותק מהסוללה	
C_0	q	V	q	V
C	$\frac{q}{q_0} = \frac{C}{C_0}$	$V = V_0$	$q = q_0$	$\frac{V}{V_0} = \frac{C}{C_0}$

איור 20: שינוי הקיבול כאשר מקור המתח מחובר לקבל, וכאשר הוא מנותק ממנו

6.9 טעינת קבל ופריקתו

עד כה עסקנו במצבים הסטציונריים של הקבל. בסעיף זה נדון בתהליכי הטעינה והפריקה של קבל-טרנזיאנטים.

במעגל המצורף קבל, וולטמטר **המודד את המתח** על הקבל, נגדים ואמפרמטר **שמודד את הזרם** במעגל. בעת שהמתג מחובר לנקודה A, הקבל נטען.



איור 21: מעגל טעינה ופריקה של קבל

נדגיש שקבל מהווה נתק במעגל, על כן הזרם לא ממש זורם דרכו, אלא הוא זורם דרך יתר מרכיבי המעגל. זרם זה מאפשר אגירת מטען בלוחות הקבל או פריקתו.

מקור המתח במעגל, ε, הוא סוללה אידאלית. ערך המטען על הלוח העליון הוא q+, המתח על הקבל הוא V, ועוצמת הזרם בענף הקבל הינה I. תהליך הטעינה נמשך כל עוד המתח על הקבל קטן ממתח הסוללה, כלומר כל עוד $V<\varepsilon$. המטען , הזרם והמתח הם גדלים משתנים בזמן, על כן יש לרשום אותם: $q(t)$, $V(t)$ ו- $I(t)$. בגמר הטעינה מתאפס הזרם, ואילו המטען ומתח הקבל מגיעים לערכיהם המרביים.

6.9 - א' פריקת קבל

אחרי סיום הטעינה מעבירים את המתג לנקודה B, וכעת מתחילה פריקת הקבל דרך הנגד R_2.

נסמן את הרגע שבו התחילה הפריקה ב- t_0, ונבחר $t_0 = 0$. ברגע זה המטען ומתח הקבל יסומנו ב- q_0, ו-V_0 בהתאמה, כאשר $V_0 = \varepsilon$.

חיבור המתג לנקודה B, מאפשר זרימת זרם דרך הנגד R_2. והמתח על הנגד שווה בכל רגע למתח על הקבל, לכן:

סיכום:

- נוח לסמן ערכים התחלתיים בסימון: d_0, C_0, V_0, q_0.
- כשמתבצע שינוי כלשהו, יש לשים לב אלו ערכים נשארים קבועים, מתח או מטען-על פי התרחיש המתואר בבעיה.
- יש לבטא ערכים חדשים באמצעות ערכים התחלתיים כגון $C = 2C_0$.
- בשיטה זו המסקנות הן מיידיות, כמו למשל $U = 2U_0$. משמעות ביטוי זה היא: האנרגיה האגורה בקבל לאחר השינוי גדולה פי 2 מערכה ההתחלתי.
- נסכם את המסקנות מדוגמאות 9 ו-10 בטבלה הבאה:

הקיבול	שינוי הקיבול מתבצע כשהקבל מחובר לסוללה		שינוי הקיבול מתבצע כאשר הקבל מנותק מהסוללה	
C_0	q	V	q	V
C	$\frac{q}{q_0} = \frac{C}{C_0}$	$V = V_0$	$q = q_0$	$\frac{V}{V_0} = \frac{C}{C_0}$

איור 20: שינוי הקיבול כאשר מקור המתח מחובר לקבל, וכאשר הוא מנותק ממנו

סיכום:

- נוח לסמן ערכים התחלתיים בסימון: d_0, C_0, V_0, q_0.
- כשמתבצע שינוי כלשהו, יש לשים לב אלו ערכים נשארים קבועים, מתח או מטען-על פי התרחיש המתואר בבעיה.
- יש לבטא ערכים חדשים באמצעות ערכים התחלתיים כגון $C = 2C_0$.
- בשיטה זו המסקנות הן מיידיות, כמו למשל $U = 2U_0$. משמעות ביטוי זה היא: האנרגיה האגורה בקבל לאחר השינוי גדולה פי 2 מערכה ההתחלתי.
- נסכם את המסקנות מדוגמאות 9 ו-10 בטבלה הבאה:

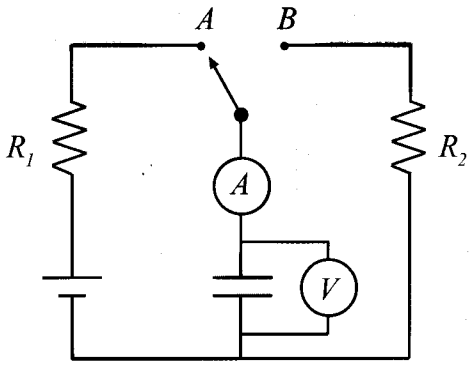
הקיבול	שינוי הקיבול מתבצע כשהקבל מחובר לסוללה		שינוי הקיבול מתבצע כאשר הקבל מנותק מהסוללה	
C_0	q	V	q	V
C	$\frac{q}{q_0} = \frac{C}{C_0}$	$V = V_0$	$q = q_0$	$\frac{V}{V_0} = \frac{C}{C_0}$

איור 20: שינוי הקיבול כאשר מקור המתח מחובר לקבל, וכאשר הוא מנותק ממנו

6.9 טעינת קבל ופריקתו

עד כה עסקנו במצבים הסטציונריים של הקבל. בסעיף זה נדון בתהליכי הטעינה והפריקה של קבל-טרנזיאנטים.

במעגל המצורף קבל, וולטמטר המודד את המתח על הקבל, נגדים ואמפרמטר שמודד את הזרם במעגל. בעת שהמתג מחובר לנקודה A, הקבל נטען.



איור 21: מעגל טעינה ופריקה של קבל

נדגיש שקבל מהווה נתק במעגל, על כן הזרם לא ממש זורם דרכו, אלא הוא זורם דרך יתר מרכיבי המעגל. זרם זה מאפשר אגירת מטען בלוחות הקבל או פריקתו.

מקור המתח במעגל, ε, הוא סוללה אידאלית. ערך המטען על הלוח העליון הוא $q+$, המתח על הקבל הוא V, ועוצמת הזרם בענף הקבל הינה I. תהליך הטעינה נמשך כל עוד המתח על הקבל קטן ממתח הסוללה, כלומר כל עוד $V<\varepsilon$. המטען , הזרם והמתח הם גדלים משתנים בזמן, על כן יש לרשום אותם: $q(t)$, $V(t)$ ו- $I(t)$. בגמר הטעינה מתאפס הזרם, ואילו המטען ומתח הקבל מגיעים לערכיהם המרביים.

6.9 - א' פריקת קבל

אחרי סיום הטעינה מעבירים את המתג לנקודה B, וכעת מתחילה פריקת הקבל דרך הנגד R_2.

נסמן את הרגע שבו התחילה הפריקה ב- t_0, ונבחר $t_0 = 0$. ברגע זה המטען ומתח הקבל יסומנו ב- q_0, ו-V_0 בהתאמה, כאשר $V_0 = \varepsilon$.

חיבור המתג לנקודה B, מאפשר זרימת זרם דרך הנגד R_2. והמתח על הנגד שווה בכל רגע למתח על הקבל, לכן:

$$V = IR_2 = \frac{q}{C}$$

נדגיש שמתח הנגד מקיים את חוק אוהם בכל רגע נתון, כלומר:

$$V(t) = I(t) \cdot R_2$$

עוצמת הזרם I, לפי הגדרתו, היא המטען שעובר דרך שטח החתך של מוליך ביחידת זמן. במקרה זה, המטען עובר מלוח אחד לשני (דרך הנגד, ולא במרווח בין הלוחות), לכן הזרם מבטא את הקצב בו הקבל **מאבד** ממטענו, ולכן:

$$I = -\frac{dq}{dt}$$

ומצרוף שתי המשוואות:

$$R_2\left(-\frac{dq}{dt}\right) = \frac{q}{C}$$

$$-R_2\left(\frac{dq}{dt}\right) = \frac{q}{C}$$

למשוואה דיפרנציאלית שמבטאת יחס ישר בין הפונקציה לנגזרת שלה, כפי שניתן לראות במשוואה האחרונה, פתרון שהוא פונקציה מעריכית מהצורה:

$$q(t) = q_0 e^{-t/RC}$$

משוואה זו מבטאת את מטען הקבל כתלות בזמן במשך תהליך הפריקה.
המתח על הקבל, כתלות בזמן הוא:

$$V(t) = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-t/RC}$$

$$V(t) = V_0 e^{-t/RC}$$

כאשר המתח על הקבל בתחילת הפריקה הוא:

$$V_0 = \frac{q_0}{C}$$

אם מחלקים את המתח על הקבל (השווה למתח על הנגד) בהתנגדות הנגד, מקבלים את עוצמת הזרם כתלות בזמן דרך מעגל הפריקה:

$$I(t) = I_0 e^{-t/RC}$$

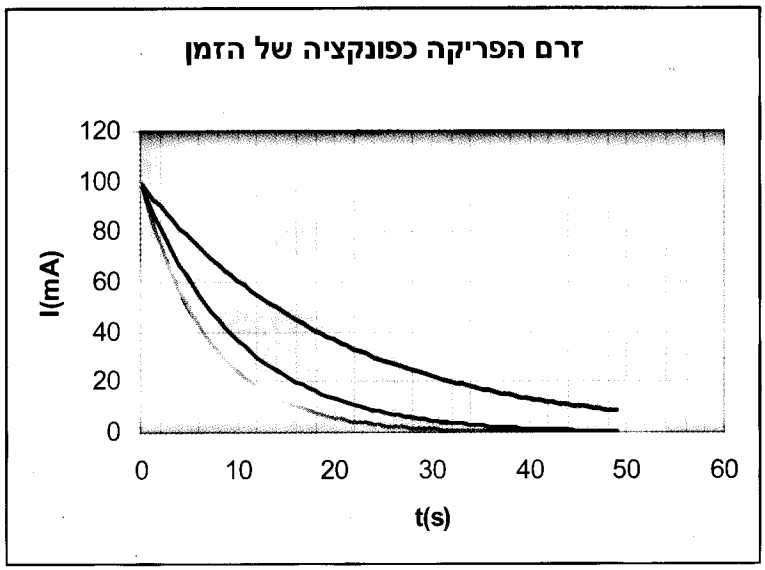
כאשר:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{q_0}{RC}$$

שלוש הפונקציות המתארות את המטען, המתח והזרם כתלות בזמן במעגל הפריקה מבטאות דעיכה מעריכית של גדלים אלה.

כפי שניתן לראות מהביטוי $q(t)$, הזמן התיאורטי הדרוש כדי להגיע ל- $q = 0$, כלומר להתרוקנות הקבל ממטענו, הוא זמן אינסופי.

באופן מעשי, קבל מאבד את מטענו בפרק זמן סופי. להבהרת עניין זה נתבונן בגרף הפריקה של שלושה קבלים שונים C_1, C_2, ו-C_3. בתחילה, המתח על כל אחד מהקבלים זהה וערכו V, והמטען על כל קבל הוא q_1, q_2, ו-q_3 בהתאמה. פורקים כל אחד מהקבלים במעגל פריקה זהה בו ערך ההתנגדות הוא R. בתנאים אלה עוצמת הזרם בזמן t_0 זהה $I = \frac{V}{R}$ בכל אחד ממעגלי הפריקה:



איור 22: גרף זרם הפריקה כתלות בזמן לשלושה קבלים שונים

מהגרף ניתן לראות את הדברים הבאים:

הקבל C_1 מתרוקן תוך כ-30 שניות;

הקבל C_2 מתרוקן תוך כ-40 שניות;

בקבל C_3 אחרי 50 שניות עוצמת זרם הפריקה היא עדיין כ-10% מערכו ההתחלתי, כלומר הוא עדיין מכיל מטען .

על פי משוואת זרם הפריקה $I(t) = I_0 e^{-t/RC}$, **כל אחד מהקבלים** צריך להתרוקן אחרי פרק זמן אינסופי.

לרוב הצרכים המעשיים לא ממש חשוב לדעת תוך כמה זמן מתרוקן קבל מסוים לחלוטין ממטענו. לעומת זאת, לעתים חשוב לדרג את הקבלים לפי הקצב בו הם מאבדים את מטענם במעגל פריקה

נתון. לדוגמה, עוצמת הזרם דועכת ל-20% מערכה ההתחלתי, לכל אחד מהקבלים תוך פרקי הזמן הבאים:

	זמן דעיכת הזרם
C_1	11s
C_2	16s
C_3	32s

בפרקי זמן אלה גם המטען על הקבלים הוא 20% מערכם ההתחלתי, כלומר $0.2q_0$.

בחירת הערך 20% בדוגמה זו היא שרירותית, אך כל ערך מספרי שייבחר מוביל למסקנה שניתן לדרג את הקבלים לפי קצב התפרקות מטענם במעגל נתון. באותה מידה ניתן היה לבחור - לצורך השוואה זו - זמן בו כל קבל מאבד 50% ממטענו ההתחלתי - או כל ערך אחר. כל בחירה כזו תוליך למסקנה שהקבל C_1 מאבד את מטענו בקצב מהיר יחסית, ולקבל C_3 נדרש הזמן הרב ביותר כדי לאבד את מטענו בדוגמה שהצגנו.

זהו הרעיון הבסיסי עליו מתבססת הגדרת "קבוע הזמן".

קבוע הזמן - τ הגדרה

קבוע הזמן מוגדר $\tau = RC$. משיקולים של נוחות החישוב, הוגדר הזמן שחולף מתחילת תהליך הפריקה של קבל עד שהמטען על הקבל מגיע לערך $q = \frac{q_0}{e}$, כאשר $e = 2.718$. נדגים זאת באופן מפורט במשוואה המייצגת את כמות מטען הקבל כפונקציה של הזמן:

$$q(t) = q_0 e^{-t/RC}$$

נציב $t = \tau = RC$:

$$q(\tau) = q_0 e^{-\frac{RC}{RC}} = qe^{-1} = \frac{q_0}{e} = \frac{q_0}{2.718} \approx 0.37q_0$$

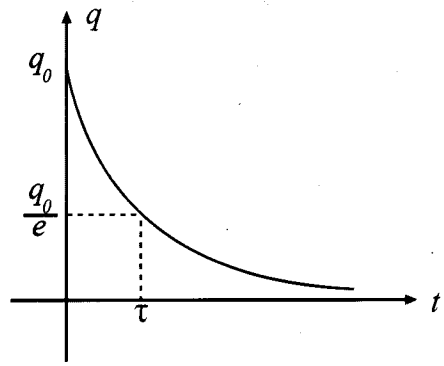
אם ל- τ ערך מספרי קטן, הקבל מתפרק בפרק זמן קצר, ולהיפך.

הערך $\frac{1}{e}$ הוא $\frac{1}{e} \approx 0.368 \approx 37\%$ כלומר תוך פרק זמן τ, יישארו על הקבל כ- 37% ממטענו ההתחלתי. זהו גם זמן דעיכת המתח על הקבל לערך $\frac{V_0}{e}$, וזמן דעיכת הזרם במעגל לערך $\frac{I_0}{e}$, כפי שניתן לראות מהמשוואות שבסעיף הקודם.

נראה שיחידות המכפלה RC מתארות זמן בשניות כאשר ההתנגדות מבוטאת ביחידות Ω, והקיבול מבוטא ביחידות F:

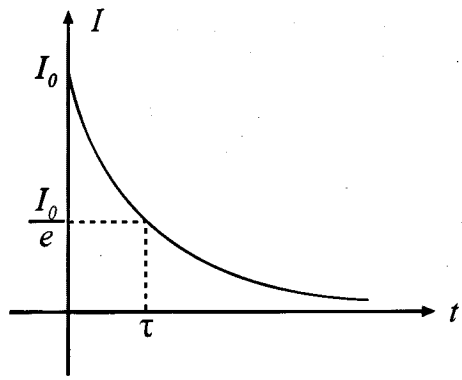
$$\frac{[V]}{[A]} \cdot \frac{[C]}{[V]} = \frac{[C]}{[A]} = \frac{[C]}{C/s} = [s]$$

באיור הבא מתואר גרף שינוי מטען הקבל כתלות בזמן, וערך המטען כאשר $t = \tau$:



איור 23: מטען הקבל כפונקציה של הזמן בתהליך פריקתו

באיור הבא מתואר גרף עוצמת זרם הפריקה כתלות בזמן. השטח מתחת לגרף זה מייצג את מטען הקבל. אם נגדיל את ערך הנגד R במעגל הפריקה, יקטן ערכו של הזרם ההתחלתי I_0, אך יארך זמן הפריקה. בשני המקרים יהיה השטח מתחת לגרף שווה בגודלו.



איור 24: עוצמת הזרם כפונקציה של הזמן במעגל הפריקה

דוגמה 11:

קבל $C = 10\mu F$ נטען באמצעות סוללה של 24V. לאחר מכן מתפרק המטען דרך נגד $R = 1k\Omega$.

א. מהי כמות המטען שמכיל הקבל בסוף הטעינה?

ב. חשב את קבוע הזמן- τ.

ג. חשב את מטען הקבל אחרי שחלף פרק זמן τ מתחילת פריקתו.

פתרון:

א. מתח הקבל בתום הטעינה הוא 24V, לכן מטענו:

$$q_0 = CV = 10^{-5}F \cdot 24V = 2.4 \cdot 10^{-4}C$$

ב. על פי הגדרת קבוע הזמן:

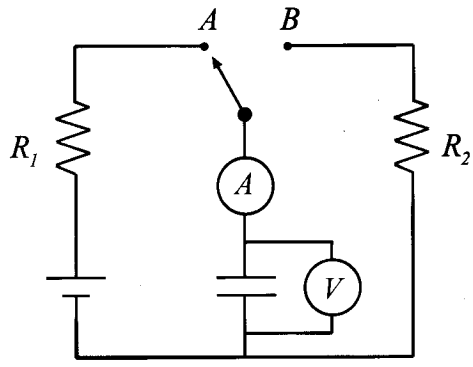
$$\tau = RC = 10^3 \cdot 10^{-5} = 10^{-2}s$$

ג. מטען הקבל אחרי שחלף זמן τ מתחילת הפריקה הוא:

$$q(\tau) = \frac{q_0}{e} = \frac{2.4 \cdot 10^{-4}C}{2.718} = 8.8 \cdot 10^{-6}C = 8.8\mu C$$

6.9- ב' טעינת קבל

נסמן עכשיו $t = 0$ את רגע סגירת מעגל הטעינה, כלומר את רגע העברת המתג למצב A.



איור 25: כאשר המתג מחובר לנקודה A הקבל נטען

נניח שהקבל לא מכיל מטען עודף ברגע זה. בזמן טעינת הקבל, מתח הדקי הסוללה שווה בערכו לסכום מתח הקבל ומתח הנגד. במעגל הנתון, הסוללה אידאלית, לכן מתח הדקיה הוא ε, על כן מתקיים:

$$\varepsilon = V_C + V_R = \frac{q}{C} + IR$$

עוצמת הזרם במקרה זה מבטאת את **קצב הצטברות המטען** על לוחות הקבל:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

ולכן:

$$\varepsilon = R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon - \frac{q}{C}}{R} = -\frac{q - C\varepsilon}{RC}$$

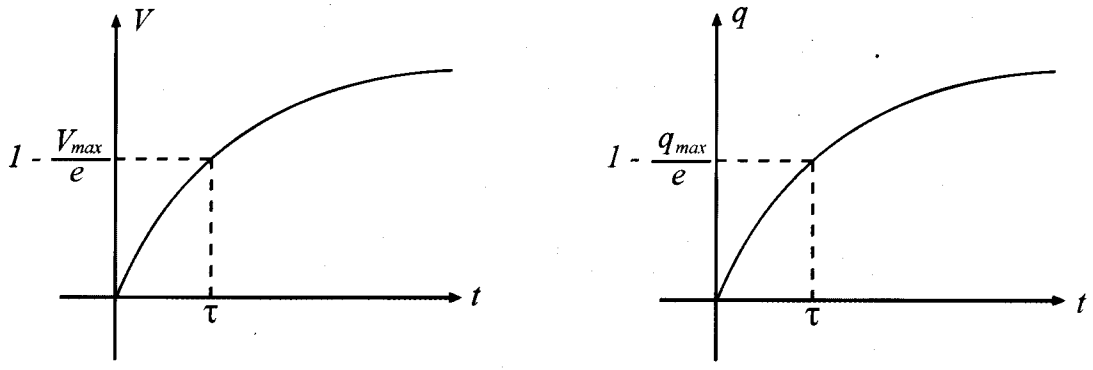
פתרון משוואה זו:

$$q(t) = q_{MAX}\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

המתח על הקבל הוא:

$$V_C = \frac{q}{C} = \frac{q_{MAX}}{C}\left(1 - e^{-t/RC}\right) = \varepsilon\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

הגרפים שלפניך מתארים את מתח הקבל ואת מטענו כפונקציה של הזמן.



איור 26: גרפים של מטען הקבל והמתח בין הלוחות בתהליך הטעינה של הקבל

המתח על הנגד מקיים:

$$V_R = \varepsilon - V_C$$

לכן:

$$V_R = \varepsilon e^{-t/RC}$$

הזרם במעגל הטעינה בכל רגע נתון מקיים את חוק אוהם, ולכן עוצמתו משתנה כתלות בזמן לפי הפונקציה:

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{\varepsilon\left(e^{-t/RC}\right)}{R} = I_0\, e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

משוואה זו זהה למשוואה שהתקבלה בעת טעינת הקבל.

ברגע $t = 0$, ערכו של הזרם הוא מרבי:

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$$

נסכם:

בעת טעינת הקבל:

- המטען q מצטבר על לוחות הקבל, וערכו גדל עם הזמן.
- מתח הקבל גדל עם הזמן.
- עוצמת הזרם קטנה עם הזמן.

דוגמה 12:

במצלמת כיס המבזק מכיל קבל $C = 120\mu F$ שנטען למתח 320V. בזמן הצילום הקבל מתפרק דרך נגד $R = 200\Omega$, ומאבד את מטענו.

א. מהי האנרגיה האגורה בקבל?

ב. הנח שהמבזק דולק באופן אפקטיבי במשך פרק זמן τ. חשב זמן זה.

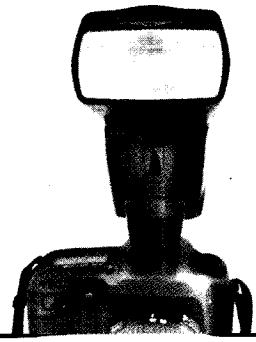
פתרון:

א. ניתן לחשב את האנרגיה האגורה בקבל בביטוי הבא:

$$U = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\cdot 1.2\cdot 10^{-4}\cdot 320^2 = 6.14J$$

ב. נחשב את קבוע הזמן של מעגל הפריקה:

$$\tau = RC = 1.2\cdot 10^{-4}\cdot 200\Omega = 2.4\cdot 10^{-2}\,s$$



איור 27: מבזק של מצלמה

6.10 שיקולי אנרגיה בטעינה ופריקה של קבל

יש לטעון קבל דרך נגד, אחרת, במעגל הטעינה עלול להיווצר זרם גדול מדי. בהעדר נגד, הסוללה, המוליכים ויתר חלקי המעגל עלולים להתחמם ולהינזק.
נבחן את האנרגיה הנאגרת בקבל הטעון:

$$U_C = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}C\varepsilon^2$$

האנרגיה שהסוללה מספקת בזמן הטעינה, כדי להעביר דרכה מטען q בהפרש פוטנציאלים קבוע $V = \varepsilon$ ניתנת ע"י הביטוי:

$$E_{BATTERY} = \varepsilon q = \varepsilon(C\varepsilon) = C\varepsilon^2$$

מחישובים אלה ניתן להסיק:

- רק מחצית מהאנרגיה שהסוללה סיפקה כאנרגיה חשמלית נאגרה בקבל[7] בזמן שהקבל נטען.
- מחצית מהאנרגיה מתבזבזת בנגד, והופכת לחום.
- בזבוז זה בלתי תלוי בערך הנגד במעגל, לכן הנצילות בכל מקרה שטוענים קבל היא תמיד 50%.
- בזמן פריקת הקבל דרך הנגד האנרגיה שנאגרה בקבל (אותם 50% שנאגרו בו) מתבזבזת, והופכת לחום בנגד דרכו מתרחשת הפריקה. כתוצאה מסיבות אלה:
- יש לטעון קבל דרך נגד, אחרת במעגל הטעינה עלול להיווצר זרם שעוצמתו גדולה מדי. במקרה כזה, קצב התחממות תיילי החיבור עלול להיות גדול מדי דבר שעלול לגרום לשריפתם.

[7] בהנחה שהסוללה אידאלית.

סיכום:

- הקבל הוא זוג מוליכים מופרדים על ידי חומר מבודד.
- הקיבול C הוא היחס בין גודל המטען q שעל כל אחד מהלוחות לבין המתח V בין הלוחות:

$$C = \frac{q}{V}$$

- יחידת הקיבול היא פארד, והיא נקראת כך לכבודו של פארדיי.

$$1F = \frac{1C}{1V}$$

- ערך הקיבול תלוי בממדי הקבל ובסוג החומר המבודד בין לוחותיו:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

כאשר:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

- עבור n קבלים מחוברים במקביל הקיבול השקול הוא:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots\ldots\ldots\ldots C_n$$

- אם הקבלים זהים מתקבל:

$$C_T = nC$$

- יחס המטענים על קבלים המחוברים במקביל הינו כיחס קיבולם:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

- המטען על קבלים מחוברים בטור זהה על כל אחד מהקבלים.

סיכום - המשך:

- עבור מספר כלשהו n של קבלים מחוברים בטור:

$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{C_1}=\frac{1}{C_2}=.....=\frac{1}{C_n}$$

הקיבול השקול ל – n קבלים זהים C מחוברים בטור:

$$C_T=\frac{C}{n}$$

- יחס המתחים על קבלים מחוברים בטור:

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{C_2}{C_1}$$

- כאשר מחברים זה לזה שני קבלים טעונים שנותקו ממקור המתח מתקיים:

$q_1^*=q_2^*=q_1=q_2$ המשוואה מבטאת את שימור המטען.

$V_1^*=V_2^*=\frac{q_1^*}{C_1}=\frac{q_2^*}{C_2}$ המשוואה מבטאת את שוויון המתחים על הקבלים.

- האנרגיה האגורה בקבל טעון מבוטאת בביטויים:

$$U=q\frac{V_f}{2}=\frac{CV^2{}_f}{2}=\frac{q^2}{2C}$$

- ערכי המטען, עוצמת הזרם ומתח הקבל כתלות בזמן בעת פריקתו:

$$q(t)=q_0e^{-t/RC}$$

$$V(t)=V_0e^{-t/RC}$$

כאשר המתח על הקבל בתחילת הפריקה הוא:

$$V_0=\frac{q_0}{C}$$

$$I(t)=I_0e^{-t/RC}$$

- קבוע הזמן במעגל מוגדר באמצעות הביטוי $\tau = RC$. בפרק זמן זה ערך המטען על הקבל במעגל פריקה הינו $\frac{q_0}{e}$.

תרגילים

הנחיות לפתרון

- $\varepsilon_0 = 8.85\cdot10^{-12}\,F/m$.
- אם לא צוין אחרת, הקבלים נמצאים באוויר או בריק.

שאלות

1. חשב את המטען שעל לוחות קבל אם קיבולו $C = 10^{-9}F$, והמתח בין לוחותיו $1000V$.

2. חשב את המתח בין לוחותיו של קבל, אם קיבולו $C = 10^{-9}F$, ומטענו $q = 5\cdot10^{-6}C$.

3. לקבל לוחות מקבילים קיבול $C = 10^{-8}F$, והמרחק בין הלוחות 1.0mm.
   א. חשב את שטחו של כל אחד מהלוחות.
   ב. איזה מתח בין הלוחות יגרום לאגירת מטען בשיעור $2\cdot10^{-12}C$ על לוח הקבל?

4. המרווח בין הלוחות של קבל הוא 1cm, ושטח כל לוח $2.0m^2$. המתח על פני הקבל הוא 1000V. חשב:
   א. את הקיבול.
   ב. את המטען על כל אחד מהלוחות.
   ג. כיצד ישתנו תשובותיך לסעיפים א ו ב' אם המתח יגדל פי 10?

5. קיבולו של קבל לוחות $C = 50nF$, ומטען כל לוח הוא $10^{-7}C$. המרחק בין לוחות הקבל 0.5mm.
   א. חשב את הפרש הפוטנציאל בין לוחות הקבל.
   ב. חשב את שטחו של כל לוח.
   ג. חשב את צפיפות המטען על כל לוח.
   ד. חשב את עוצמת השדה החשמלי בין לוחות הקבל.

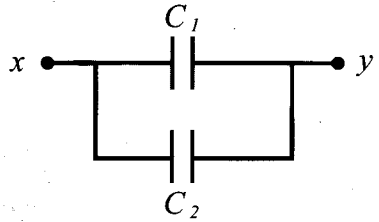
6. עוצמת השדה החשמלי בין לוחותיו של קבל היא $E = 4\cdot10^3\ V/m$, והמרחק בין הלוחות 2mm. ידוע שהלוחות מקבילים, וצורתם מלבן באורך 6cm, ורוחב 2cm.
   א. חשב את הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות.
   ב. חשב את קיבולו של הקבל.
   ג. חשב את המטען על כל אחד מהלוחות.
   ד. מהי תאוצתו של גוף קטן, טעון, שמסתו m, ומטענו q החולף בין לוחות הקבל?

7. קיבולו של קבל לוחות $2\mu F$, והפרש הפוטנציאל בין הלוחות 1000V:
   א. חשב את המטען על כל אחד מלוחות הקבל.
   ב. כמה מטען יש להוסיף לכל לוח כדי שהפרש הפוטנציאל יוכפל?

8. קיבול של קבל לוחות $2\mu F$, והמתח בין לוחותיו 500V.
   א. חשב את מטען הקבל.
   ב. איזו כמות של מטען יש לסלק (מכל לוח) כדי שהמתח בין הלוחות יקטן ב-200V?

חיבור קבלים בפיקביל

9. באיור ערכי הקיבול הם $C_1 = 8\mu F$ ו $C_2 = 2\mu F$, והמתח בין לוחות הקבל הוא $V_{xy} = 100V$.
   א. חשב את המטען על כל קבל.
   ב. חשב ערכו של הקבל השקול לשני הקבלים ואת מטענו.



איור לשאלות 9-10

10. באיור $C_1 = 3\mu F$ ו- $C_2 = 4.5\mu F$.
המטען על הקבל העליון הוא $9\cdot10^{-5}C$.
חשב:
א. את המטען על הקבל C_2.
ב. את המטען על הקבל השקול לקבלים שבשאלה.

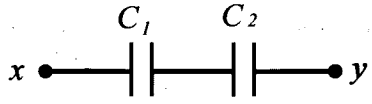
11. n קבלים זהים מחוברים במקביל. באיור הקבל השקול של קבלים אלה.

המתח על הקבל השקול 36V, ומטענו $q_T = 7.2\cdot10^{-4}C$. חשב את ערכו של כל קבל, את מטענו, ואת המתח עליו אם:
א. $n = 1$
ב. $n = 2$
ג. $n = 3$
ד. n קבלים זהים חוברו במקביל.

חיבור טורי ומקבילי של קבלים

אנרגיה אגורה בקבל

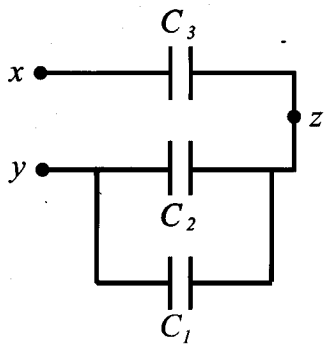
12. באיור $C_1 = 2\mu F$ ו- $C_2 = 2\mu F$. המתח $V_{xy} = 200V$.
א. חשב את המתח על כל קבל.
ב. חשב את המטען על כל קבל.



איור לשאלות 12-13

13. באיור $C_1 = 2\mu F$ ו- $C_2 = 8\mu F$. המתח $V_{xy} = 200V$: חשב את
א. הקיבול השקול בין הנקודות xy.
ב. המטען על הקבל השקול.
ג. המטען ואת המתח של כל אחד מהקבלים C_1 ו C_2.
ד. האנרגיה האגורה בכל קבל.

14. המתח בין הנקודות xy הוא 600V וערכי הקבלים הם $C_1 = 3\mu F$, $C_2 = 2\mu F$ ו- $C_3 = 4\mu F$.

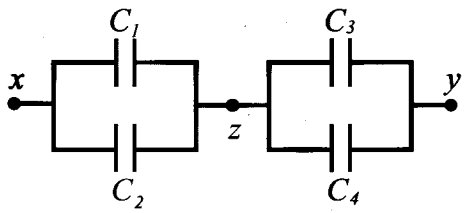


איור לשאלות 14-15

א. חשב את המטען על כל קבל.
ב. חשב את המתח על כל קבל.
ג. חשב את האנרגיה האגורה בקבל C_1.

15. המתח בין הנקודות xy הוא 72V. ערכי הקיבול הם $C_1 = 3\mu F$, $C_2 = 6\mu F$ ו $C_3 = 18\mu F$. ראה איור לעיל.
חשב את:
א. הקיבול השקול בין הנקודות xy.
ב. המטען על כל אחד מהקבלים.
ג. הפרש הפוטנציאל על כל קבל.
ד. הפרש הפוטנציאל בין הנקודות xz.

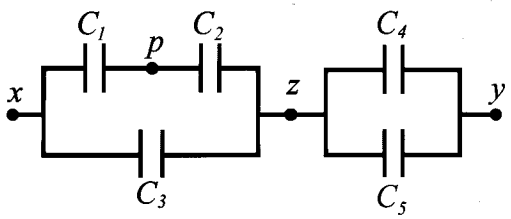
16. $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 5\mu F$ והמתח $V_{xy} = 30V$ חשב את:



א. המטען על כל קבל.
ב. המתח על כל קבל.
ג. האנרגיה האגורה במערך הקבלים.

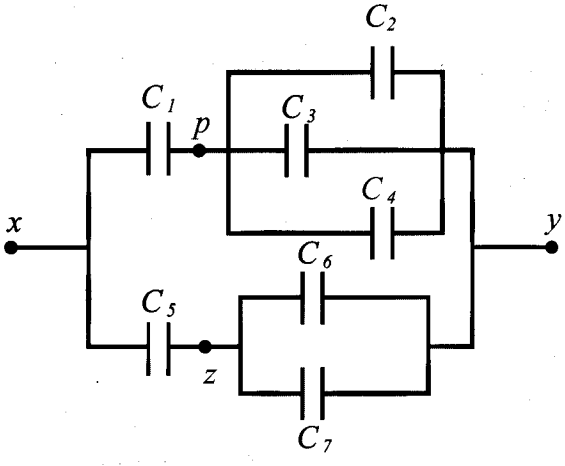
ד. האנרגיה האגורה בין הנקודות xz.

*17. המתח בין הנקודות xy הוא 120V.
ערכי הקיבול הם: $C_1 = C_2 = C_3 = 4\mu F$
ו $C_4 = C_5 = 2\mu F$. חשב את:



א. האנרגיה האגורה במערך הקבלים.
ב. המתח V_{xz} ו V_{zy}.
ג. המתח V_{xp}.
ד. האנרגיה האגורה בקבל C_2.

18. ערכי הקבלים באיור הם:
$C_1 = 12\mu F$, $C_2 = 1\mu F$, $C_3 = 2\mu F$,
$C_4 = 3\mu F$, $C_5 = 18\mu F$, $C_6 = 4\mu F$,
$C_7 = 5\mu F$ והמתח $V_{xy} = 240V$.



חשב את:
א. הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות xp.
ב. הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות xz.
ג. הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות pz.

19. קבל שקיבולו $C_1 = 2\mu F$ מחובר למתח של 1000V.
א. חשב את מטענו של הקבל.
ב. חשב את האנרגיה האגורה בקבל.
מנתקים את הקבל הראשון ממקור המתח, ומחברים אליו במקביל קבל אחר, זהה בקיבולו, $C_2 = C_1 = 2\mu F$ **שאינו טעון.**
ג. חשב את המתח הסופי על כל קבל.
ד. חשב את האנרגיה האגורה במערכת הקבלים לאחר שחוברו יחד.
ה. חשב את שינוי האנרגיה האגורה בקבלים כתוצאה מכך שחוברו יחד.
ו. מדוע התשובות לסעיפים ב' ו-ד' אינן זהות? פרט תשובתך.

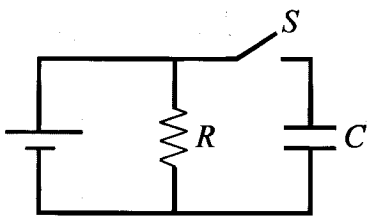
20. קבל שקיבולו $C_1 = 2\mu F$ מחובר למתח של 1000V. חשב את:
א. מטענו של הקבל.
ב. האנרגיה האגורה בקבל.
מנתקים את C_1 ממקור המתח, ומחברים אליו במקביל קבל אחר, $C_2 = 4\mu F$ **שאינו טעון.**
ג. המתח הסופי על כל קבל.
ד. יחס המטענים על כל קבל לאחר שחוברו יחד.
ה. האנרגיה שנותרה בקבלים אחרי שחוברו יחד.

21. לקבל לוחות מקבילים קיבול 1nF. המטען על כל לוח הוא $10^{-6}C$.
א. חשב את הפרש הפוטנציאל בין הלוחות.
ב. **בהנחה שמטען הקבל נשאר ללא שינוי,** מה יהיה הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות, אם המרווח בין הלוחות יוכפל?
ג. כמה עבודה נדרשת כדי להכפיל את המרווח בין הלוחות?

22. קבל לוחות $C = 1nF$ מחובר למצבר של מכונית היוצר מתח של 12V על הקבל. **כל עוד הלוחות מחוברים למצבר, הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות נשאר קבוע.**
א. חשב את המטען על לוחות הקבל.
ב. חשב את האנרגיה האגורה בקבל.
בעוד הלוחות מחוברים למצבר, מגדילים פי 2 את המרווח בין הלוחות.
ג. מהו המטען על כל לוח במצב החדש?
ד. מהי האנרגיה האגורה עתה בקבל?
ה. מתברר שהאנרגיה האגורה בקבל קטנה עם הרחקת הלוחות. מאידך, הרחקת הלוחות כרוכה בביצוע עבודה של כוח

חיצוני, כי הלוחות מושכים זה את זה. מה עלה בגורלה של האנרגיה "שנעלמה" מלוחות הקבל?

23. באיור סוללה $\varepsilon = 12V$, בעלת התנגדות פנימית $r = 1\Omega$ מחוברת לנגד $R = 3\Omega$. הקבל $C = 2\mu F$, בתחילה אינו מכיל מטען חשמלי. במצב זה סוגרים את המתג:

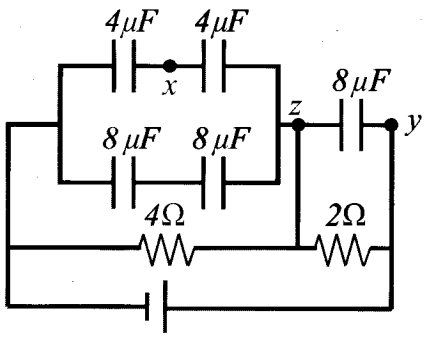


א. מהו המתח על הקבל זמן רב מאוד אחרי שהמתג נסגר?

ב. מהי האנרגיה האגורה בקבל?

ג. כיצד תושפענה תשובותיך לסעיפים הקודמים אם הנגד יוחלף בנגד אחר $R_2 = 7\Omega$? נמק תשובתך.

24. באיור רשת חשמלית מורכבת מסוללה אידאלית $\varepsilon = 12V$, נגדים וקבלים.



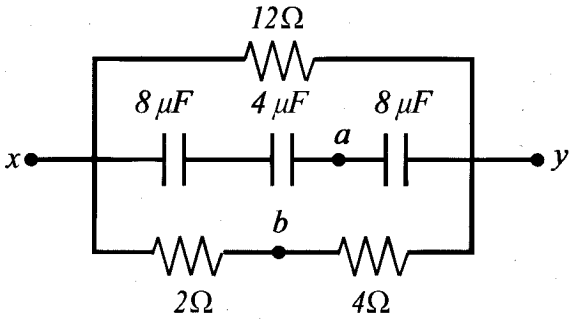
הנח שהרשת מחוברת זמן רב, לכן המערכת נמצאת במצב סטציונרי, ("מצב עמיד"), כלומר הזרמים והמטענים התייצבו. במצב זה:

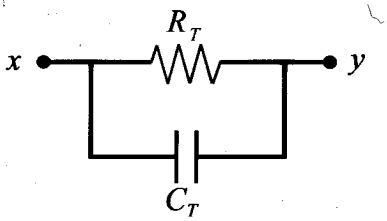
א. חשב את המטען על כל קבל.

ב. חשב את המתח V_{zy}.

ג. חשב את הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות xy. איזו מבין הנקודות נמצאת בפוטנציאל גבוה יותר?

25. בין הנקודות xy חלק מרשת חשמלית מורכבת מנגדים וקבלים, כמתואר באיור. האיור הנוסף מתאר את הרשת השקולה. נתון: $V_{xy} = 12V$.





א. חשב את ההתנגדות השקולה R_T ואת הקיבול השקול C_T.

ב. חשב את הזרם בכל נגד.

ג. חשב את האנרגיה האגורה בקבל C_T.

ד. חשב את המתח בין הנקודות ab.

26. קבל שקיבולו C_0, מחובר למקור מתח אידאלי. נכנה את המטען המצטבר על לוחות הקבל q_0. במצב זה, **בלי לנתק את הקבל ממקור המתח** מכניסים בין לוחות הקבל חומר מבודד בעל דיאלקטרי $\varepsilon_r = 2$. בטא בנתוני השאלה את:

א. הקיבול.

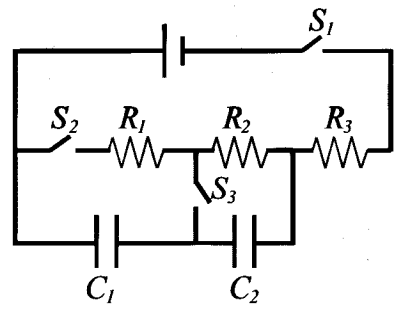
ב. המתח על הקבל לפני ואחרי הכנסת החומר המבודד.

ג. האנרגיה האגורה בקבל לפני ואחרי הכנסת החומר המבודד.

27. קיבולו של קבל C_0, והוא מחובר למקור מתח אידאלי. מטען הקבל במצב זה q_0. **מנתקים את הקבל מהמקור**, ומכניסים חומר דיאלקטרי בעל קבוע $\varepsilon_r = 2$ בין לוחות הקבל.
בטא בנתוני השאלה את:

א. הקיבול.
ב. המתח על הקבל לפני ואחרי הכנסת החומר המבודד.
ג. האנרגיה האגורה בקבל לפני ואחרי הכנסת החומר המבודד.

28. במעגל המתואר באיור, הסוללה והאמפרמטר אידאלים. נתונים:
$\varepsilon = 120V$, $R_1 = R_2 = 100\Omega$,
$R_3 = 800\Omega$, $C_1 = 2\mu F$ ו- $C_2 = 8\mu F$.



חשב את הזרם בסוללה ואת המטען על כל אחד מהקבלים במקרים הבאים:
א. מפסק S_1 בלבד סגור.
ב. המפסקים S_1, ו- S_2 בלבד סגורים.
ג. שלושת המפסקים סגורים.
ד. המפסקים S_1, ו- S_3 בלבד סגורים.

טעינה ופריקה של קבל- הטרנזיאנט (מצב המעבר)

29. הסבר מדוע בעת טעינת קבל או פריקתו אין זרם דרך הקבל. אם כך, על איזה זרם מדובר כשטוענים קבל? לווה הסברך באיור מתאים.

30. בדרך כלל מעגל טעינה מכיל סוללה, נגד וקבל, ומעגל פריקה מכיל קבל ונגד.
א. מדוע עוצמת הזרם אינה קבועה בזמן הטעינה ובזמן פריקת הקבל? שרטט את המעגלים, וכתוב תשובה מנומקת לכל אחד מהמקרים.
ב. כיצד משתנה מתח הדקי הסוללה בעת טעינת הקבל?

31. פורקים את המטען שנאגר בקבל לוחות מקבילים דרך נגד. האם הנגד דרכו נפרק המטען מקיים את חוק אוהם בעת פריקת הקבל?

32. במהלך שיעור פיזיקה בעת שנלמד נושא פריקת מטען הקבל במעגל RC, נאמר המשפט הבא: "עוצמת זרם המים שיוצאים דרך חור בתחתית חבית גלילית, מתוארת על ידי פונקציה מעריכית, בדומה לעוצמת הזרם בעת פריקת קבל". תלמיד ביצע במעבדה את ניסוי זרם מים מתוך מיכל גלילי, ומדד את התוצאות הבאות:
(גם אתה יכול לבצע ניסוי כזה!)

זמן (שניות)	עוצמת זרימה (cm^3/s)
0 (דלי מלא)	
10	81.9
20	67.0
30	54.9
40	44.9
50	36.8
60	30.1
70	24.7
80	20.2
90	16.5
100	13.5

כעבור 100 שניות נשארו בגליל כ- 68 סמ"ק מים.
א. שרטט גרף עוצמת הזרם כתלות בזמן, בקנה מידה מתאים.
ב. מה הייתה עוצמת זרם המים בתחילת הניסוי בזמן $t = 0$?
ג. מה מייצג השטח הכלוא בין הגרף לצירים?
ד. חשב את כמות המים שהיו בגליל המלא.
ה. תוך כמה זמן בערך קטן ערך עוצמת הזרם למחצית מעוצמתה ההתחלתית? לרבע מהעוצמה ההתחלתית? לשמינית מהעוצמה ההתחלתית?
ו. כתוב במילים את המסקנה המתקבלת מפתרון סעיף ה' בשאלה זו.

33. קבל שקיבולו $C = 500\mu F$ חובר למקור מתח של 10V, ואחרי שהמתח עליו היה 10V, נותק ממקור המתח, וחובר למעגל פריקה דרך נגד $R = 100k\Omega$. בעת סגירת מתג המעגל הייתה עוצמת הזרם $I_0 = 100\mu A$. עוצמת הזרם נמדדה כל 10 שניות, והתקבלו התוצאות הבאות:

זמן (s)	עוצמת הזרם (μA)
0 (קבל טעון)	100
10	81.9
20	67.0
30	54.9
40	44.9
50	36.8
60	30.1
70	24.7
80	20.2
90	16.5
100	13.5

כעבור 100 שניות היה מטען הקבל $6.8\cdot10^{-4}C$.

א. שרטט גרף עוצמת הזרם כתלות בזמן.

ב. חשב <u>על פי הגרף</u> את המטען ההתחלתי של הקבל.

ג. השווה את התוצאה בסעיף ב' לערך המטען המחושב לפי הקשר $q = CV$.

ד. שים לב שעוצמת הזרם כעבור 10 שניות היא אחוז מסוים של עוצמת הזרם הקודמת, <u>בכל מדידה</u>. מהו אחוז זה בתרגיל הנוכחי?

ה. חשב את קבוע הזמן RC. מהו היחס בין עוצמת הזרם בזמן $t = RC$, לבין עוצמתו ההתחלתית?

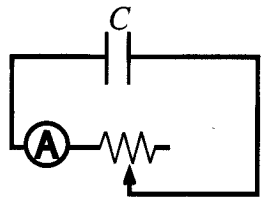
ו. טענה: "בכל מקרה שחולף פרק זמן $\Delta t = RC$, עוצמת הזרם קטנה ל-$\approx 37\%$ מערכו". בדוק טענה זו לשלושה ערכים שונים של נתוני הטבלה בשאלה זו.

ז. מהי עוצמת הזרם ב- $t = 110s$?

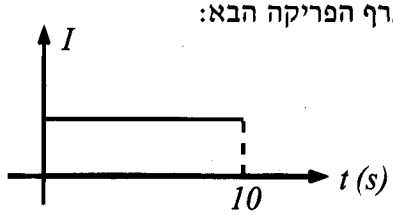
ח. חשב כמה פעמים חולף פרק הזמן τ, עד אשר מטען הקבל קטן מאחוז אחד ממטענו ההתחלתי.

ט. דון במשפט: "כאשר פורקים קבל, אחרי שחלף זמן $\Delta t = 5\tau$, הקבל יכול להיחשב פרוק ממטענו". לביסוס טענותיך, <u>חשב</u> <u>באחוזים</u> את המטען שנותר על הקבל אחרי פרק זמן $\Delta t = 5\tau$.

34. בתרשים מעגל חשמלי המכיל קבל, מד זרם שהתנגדותו זניחה, $C = 100\mu F$, ונגד משתנה בתחום $0 - 400K\Omega$.



הקבל טעון למתח 12V, ובמצב זה פורקים אותו דרך נגד משתנה. מתקבל גרף הפריקה הבא:

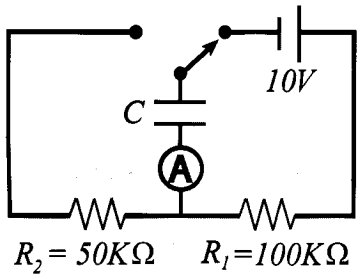


א. כיצד יש לשנות את ערך הנגד המשתנה כדי לקבל את גרף הפריקה המתואר?

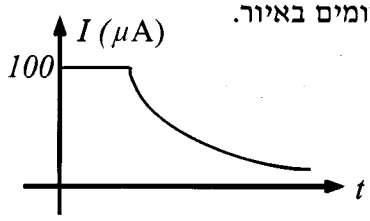
ב. בהנחה שהקבל נפרק לחלוטין, מה הייתה עוצמת זרם הפריקה?

ג. מה היה ערכו של הנגד המשתנה בעת שהמעגל נסגר, בזמן $t = 0$?

35. במעגל המצורף הקבל $C = 100\mu F$ נטען דרך הנגד R_1, ונפרק דרך הנגד R_2.



באיור מתואר גרף הטעינה. ערכי הנגדים רשומים באיור.

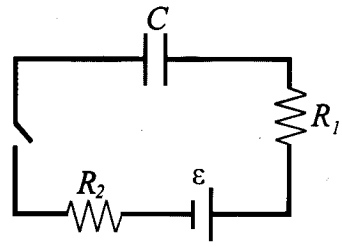


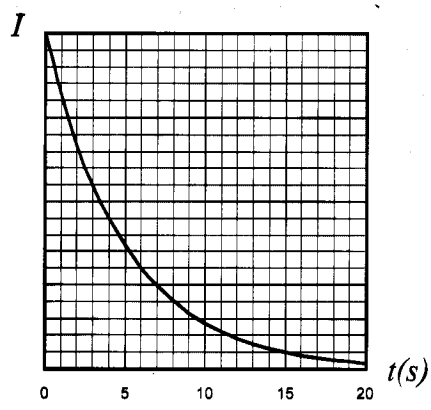
א. העתק את הגרף והוסף בו בקנה מידה סביר (גרף איכותי בלבד, אין צורך לחשב ערכים בודדים) את גרף הפריקה.

ב. שרטט גרפים שהיו מתקבלים אילו ערכי הנגדים היו $R_1 = R_2 = 50k\Omega$.

ג. שרטט גרפים איכותיים שהיו מתקבלים אילו ערכי הנגדים היו $R_1 = 100k\Omega$ ו- $R_2 = 20k\Omega$.

36. נתון מעגל חשמלי המאפשר טעינת קבל. המעגל מכיל סוללה $\varepsilon = 4V$ אידאלית, שני נגדים זהים $R_1 = R_2 = 500\Omega$. ערך קיבולו של הקבל אינו ידוע. ברגע $t = 0$ סוגרים את המתג.





א. מהי עוצמת הזרם ברגע $t = 0$?

ב. האם עוצמת הזרם בנגד R_1 גדולה, שווה או קטנה בהשוואה לעוצמת הזרם בנגד R_2? נמק תשובתך.

ג. מצא מתוך הגרף המצורף את קבוע הזמן τ במעגל.

ד. מצא את קיבולו של הקבל C.

ה. חשב את מטענו של הקבל כאשר הוא טעון לחלוטין.

ו. האם המטען שחישבת בסעיף הקודם שווה, קטן או גדול בהשוואה למטען שעבר בסוללה? נמק תשובתך.

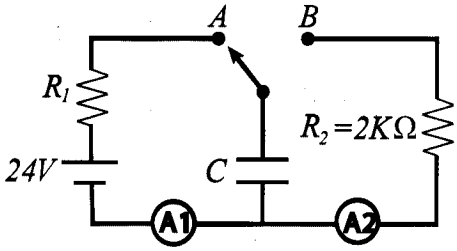
ז. כמה אנרגיה סיפקה הסוללה בתהליך הטעינה?

ח. כמה אנרגיה אגורה בקבל בתום הטעינה?

ט. מדוע שונות התוצאות בשני הסעיפים האחרונים?

י. מהו היחס בין האנרגיה האגורה בקבל לאנרגיה שסופקה על ידי הסוללה?

37. תלמיד מבצע ניסוי בטעינה ופריקה של קבל. בתרשים א' מתואר מעגל חשמלי המאפשר את ביצוע הניסוי. האמפרמטרים בניסוי יכולים להיחשב אידאליים.



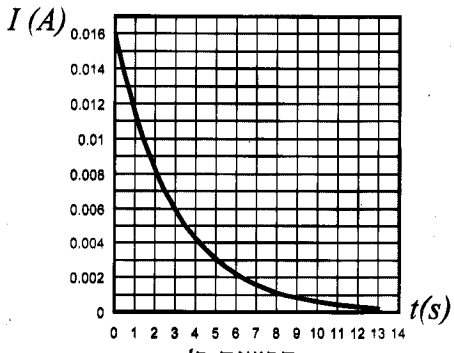
תרשים א'

א. הסבר מה מאפיין אמפרמטר אידאלי.

ב. מחברים את המתג S לנקודה A. מהו המתח על הקבל לאחר זמן רב, ומה מראה האמפרמטר A_1 במצב זה? הסבר שיקולך.

ג. לאחר זמן רב מעבירים את המתג מהנקודה A לנקודה B. מהו הזרם המרבי שיראה האמפרמטר A_2? הסבר שיקולך.

ד. האם הנגדים במעגל זה מקיימים את חוק אוהם? הסבר תשובתך.



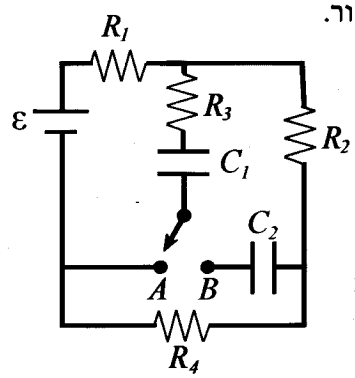
תרשים ב'

ה. תרשים ב' מתאר את הזרם שנמדד על ידי אחד האמפרמטרים. האם הגרף שבתרשים ב' עשוי להתאים לזרם שנמדד על ידי האמפרמטר A_1 או A_2? נמק.

ו. חשב את קיבול הקבל C.

ז. חוזרים על הניסוי באמצעות קבל C_2 המקיים $C_2 < C$. האם השטח, המוגבל על ידי הגרף בתרשים ב' ועל-ידי הצירים, קטן, גדל, או אינו משתנה? הסבר תשובתך.

38. המעגל החשמלי באיור מכיל מקור מתח אידאלי $\varepsilon = 12V$, וארבעה נגדים זהים $R = 2\Omega$. הקבלים $C_1 = 3\mu F$ ו- $C_2 = 4\mu F$ חסרי מטען. המתג יכול לגעת בנקודות A או B המתוארות באיור.



<u>מעבירים את המתג למצב A, וממתינים זמן רב.</u>

א. חשב את עוצמת הזרם בנגד R_1.

ב. חשב את המטען על כל אחד משני הקבלים.

<u>פורקים את הקבלים - מעבירים את המתג לנקודה B, וממתינים זמן רב.</u>

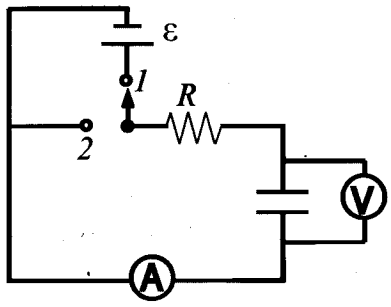
ג. מצא את עוצמת הזרם בנגד R_1.

ד. חשב את המטען **על כל אחד מהקבלים**.

ה. איזה מהנגדים אינו משפיע על עוצמת הזרם העובר בנגד R_4?

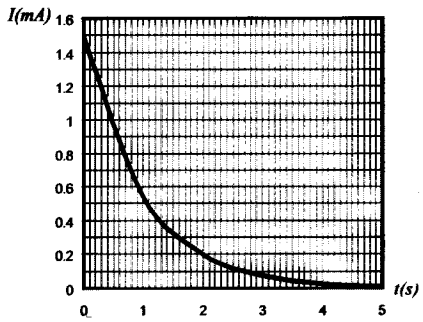
ו. במצב המתואר, כאשר המתג מחובר לנקודה - B, מקטינים את המרחק בין לוחות הקבל C_2 כך שהמרחק הוא עתה מחצית מהמרחק המקורי, ושוב ממתינים זמן רב. מהו עתה המטען **על כל אחד מהקבלים**?

39. באיור א' מתואר מעגל טעינה ופריקה של קבל. מכשירי המדידה והסוללה אידאליים.



איור א'

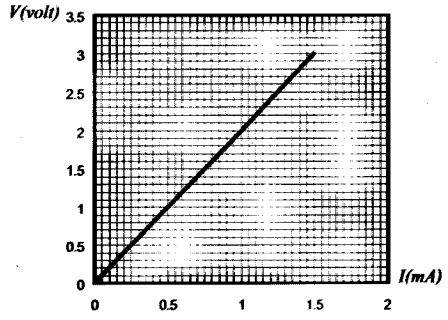
לאחר זמן רב מעבירים את המתג ממצב 1 למצב 2, ופורקים את הקבל. נתוני מכשירי המדידה מועברים למחשב. באיור ב' מוצג גרף הזרם ביחידות mA כתלות בזמן.



איור ב'

א. האם מתואר גרף טעינה, פריקה או שלא ניתן לקבוע זאת? נמק תשובתך.

ב. באיור ג' מתואר גרף <u>המתח כפונקציה של הזרם</u>. האם גרף זה התקבל בשלב הטעינה, הפריקה או שלא ניתן לדעת באיזה שלב התקבל? נמק תשובתך.

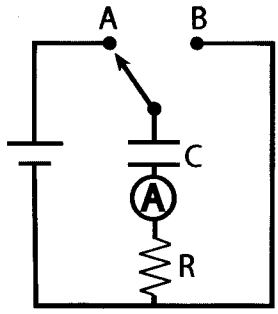


איור ג'

ג. היעזר באחד הגרפים או בשניהם, וחשב את התנגדות הנגד. הסבר פתרונך.
ד. חשב מתוך אחד הגרפים את קבוע הזמן τ. הסבר פתרונך.
ה. חשב את הקיבול C של הקבל.

40. המתח על קבל $C_1 = 10mF$ הוא 300V. מנתקים את הקבל ממקור המתח, ובזמן $t = 0$ מתחילה פריקתו של הקבל דרך נגד $R = 0.5\,k\Omega$.
א. חשב את הזרם I_0 בזמן $t = 0$.
ב. חשב את ערכי עוצמות הזרם בזמנים 2s, 4s, 6s, 8s.
ג. **על סמך התוצאות שהתקבלו בסעיף הקודם**, מהו בערך קבוע הזמן?
ד. חשב את קבוע הזמן $\tau = RC$.
ה. הסבר במילים את משמעותו של "קבוע הזמן" המבוטא על ידי המכפלה RC.

41. מעגל חשמלי שמכיל מד זרם חסר התנגדות, סוללה אידאלית $\varepsilon = 24V$, נגד $R = 10k\Omega$, וקבל $C = 5mF$. לאחר שהקבל נטען, מעבירים את המתג למצב בו מתחילה הפריקה. נכנה זמן זה $t = 0$.



א. מהו המתח על הקבל בזמן $t = 0$?
ב. מהו המטען על הקבל בזמן $t = 0$?
ג. מהי עוצמת הזרם בזמן $t = 0$?
ד. חשב את קבוע הזמן τ, של המעגל.
ה. חשב את ערך עוצמת הזרם בזמן τ.
ו. חשב את היחס בין האנרגיה האגורה בקבל בזמן τ, לבין האנרגיה האגורה בו בזמן $t = 0$.

42. בשאלה הקודמת הוחלף הנגד R בנגד אחר $R' = 20k\Omega$, יתר הפרטים זהים. חזור וענה על שאלות א'-ז' במצב החדש.

43. בשאלה **41** הוחלפה הסוללה באחרת, $\varepsilon' = 48V$. יתר הנתונים כמו בשאלה 41. ענה על סעיפים א'-ז' במצב זה.

תשובות לפרק 6

1. $10^{-6}C$
2. $5\cdot10^{3}V$
3.
א. $1.13m^2$
ב. $2\cdot10^{-4}V$
4.
א. $1.77\cdot10^{-9}F$
ב. $1.77\cdot10^{-6}C$
ג. אין שינוי; גדל פי **10**
5.
א. 2V
ב. $2.82m^2$
ג. $3.54\cdot10^{-8}C/m^2$
ד. $4.33\cdot10^{3}V/m$
6.
א. 8V
ב. $5.31\cdot10^{-12}F$
ג. $3.19\cdot10^{-11}C$
ד. $4\cdot10^{3}q/m$
7.
א. $2\cdot10^{-3}C$
ב. $2\cdot10^{-3}C$
8.
א. $10^{-3}C$
ב. $4\cdot10^{-4}C$
9.
א. $8\cdot10^{-4}C$
$2\cdot10^{-4}C$
ב. $10^{-3}C$; $10^{-5}F$
10.
א. $1.35\cdot10^{-4}C$
ב. $2.25\cdot10^{-4}C$
11.
א. $2\cdot10^{-5}F$
$7.2\cdot10^{-4}C$
36V
ד. $\frac{2}{n}\cdot10^{-5}F$
$\frac{7.2}{n}\cdot10^{-4}C$
36V
12.
א. $V_1 = V_2 = 100V$
ב. $q_1 = q_2 = 2\cdot10^{-4}C$
13.
א. $1.6\cdot10^{-6}F$
ב. $3.2\cdot10^{-4}C$
ג. $q_1 = q_2 = 3.2\cdot10^{-4}C$
160V
40V
ד. $2.56\cdot10^{-2}J$
$6.4\cdot10^{-3}J$
14.
א. $8\cdot10^{-4}C$
$5.3\cdot10^{-4}C$
$1.33\cdot10^{-3}C$
ב. $V_1 = V_2 = 267V$
$V_3 = 333V$
ג. 0.107J
15.
א. $6\mu F$
ב. $1.44\cdot10^{-4}C$
$2.88\cdot10^{-4}C$
$4.32\cdot10^{-4}C$
ג. $V_1 = V_2 = 48V$

$V_3 = 24V$

ד. 24V

16.

א. $7.5\cdot10^{-5}C$

ב. 15V

ג. 15V

ד. $2.25\cdot10^{-3}J$

17.

א. $1.73\cdot10^{-3}J$

ב. 48V

72V

ג. 24V

ד. $1.15\cdot10^{-3}J$

18.

א. 80V

ב. 80V

ג. 0

19.

א. $2\cdot10^{-3}C$

ב. 1J

ג. 500V

ד. 0.5J

ה. -0.5J

20.

א. $2\cdot10^{-3}C$

ב. 1J

ג. 333.33V

ד. 1:2

ה. 0.33J

21.

א. 1000V

ב. 2000V

ג. $5\cdot10^{-4}J$

22.

א. $1.2\cdot10^{-8}C$

ב. $7.2\cdot10^{-8}J$

ג. $6\cdot10^{-9}C$

ד. $3.6\cdot10^{-8}J$

23.

א. 12V

ב. $1.44\cdot10^{-4}J$

ג. אין השפעה.

24.

א. $C_{8\mu F} = 32\mu C$

$C_{4\mu F} = 16\mu C$

ב. 4V

ג. 8V

$V_y > V_x$

25.

א. 4Ω

$2\mu F$

ב. 1A

2A

ג. $1.44\cdot10^{-4}J$

ד. 3V

26.

א. $2C_0$

ב. q_0/C_0

q_0/C_0

ג. $q_0^2/2C_0$

q_0^2/C_0

27.

א. $2C_0$

ב. q_0/C_0

$q_0/2C_0$

ג. $q_0^2/2C_0$

$q_0^2/4C_0$

28.

א. $I = 0$

$q_1 = q_2 = 1.92\cdot10^{-4}C$

ב. 0.12A

$q_1 = q_2 = 3.84\cdot10^{-5}C$

ג. 0.12A

$2.4\cdot10^{-5}C$

$9.6\cdot10^{-5}C$

ד. $I = 0$

$q_1 = 2.4\cdot10^{-4}C$

$q_2 = 0$

30. ב. גדל

32.

ב. $100cm^3/s$

ד. $\approx 4300cm^3$

ה. 35s

70s

100s

33.

ב. $\approx 4230\mu C$

ד. $\approx 82\%$

ה. 50s

$\approx 37\%$

ז. $11\mu A$

ח. 4.6

ט. 0.67%

34.

ב. $1.2\cdot10^{-4}A$

ג. $100K\Omega$

36.

א. $4\cdot10^{-3}A$

ב. $I_1 = I_2$

ג. 5s

ד. $5\cdot10^{-3}F$

ה. $2\cdot10^{-2}C$

ז. $8\cdot10^{-2}J$

ח. $4\cdot10^{-2}J$

י. 50%

37.

ב. 24V

$I = 0$

ג. 12mA

ה. A_1

ו. 2mF

38.

א. 2A

ב. $2.4\cdot10^{-5}C$

0

ג. 2A

ד. $6.86\mu C$

39.

ג. 2000Ω

ד. 1s

ה. $5\cdot10^{-4}F$

40.

א. 0.6A

ב. 0.57A

0.27A

0.18A

0.12A

ג. $\tau > 4s$

ד. 5s

41.

א. 24V

ב. 0.12C

ג. $2.4\cdot10^{-3}A$

ד. 50s

ה. $8.88\cdot10^{-4}A$

ו. $\approx 14\%$

42.

א. 24V

ב. 0.12C

ג. $1.2\cdot10^{-3}A$

ד. 100s

ה. $4.44\cdot10^{-4}A$

43.

א. 48V

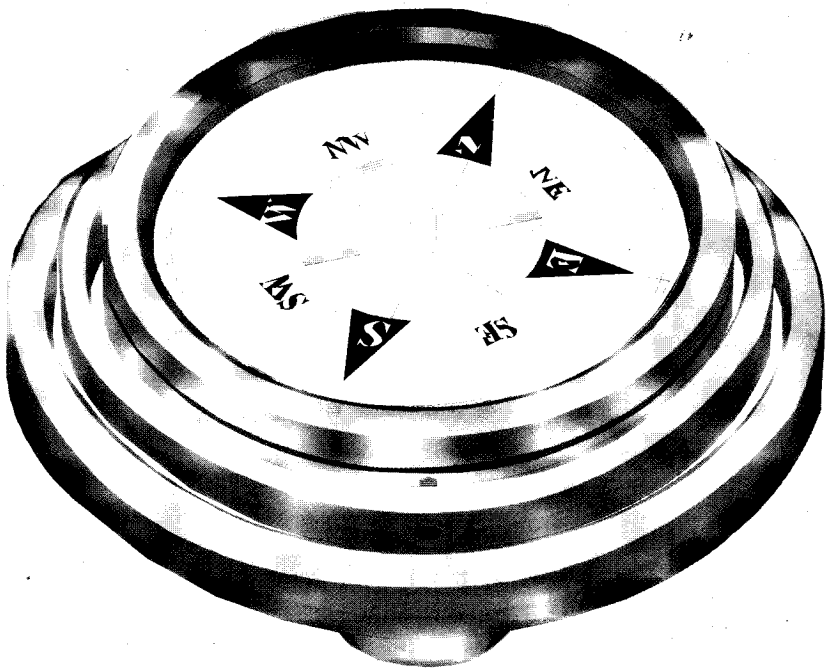
ב. 0.24C

ג. $4.8\cdot10^{-3}A$

ד. 50s

ה. $1.77\cdot10^{-3}A$

השדה המגנטי

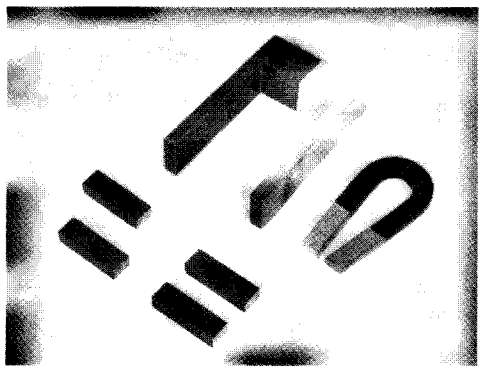


השדה המגנטי וכוחות מגנטיים

7.1 הקדמה

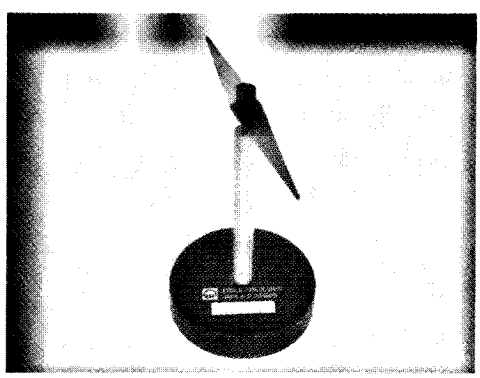
המצפן הוא אמצעי הניווט הנפוץ ביותר, והוא מאפשר להתמצא בנקל בכל מקום על כדור הארץ. לב ליבו של המצפן הוא מגנט קטן, המסוגל להסתובב סביב ציר אנכי. מגנט הוא חלק מרכזי במכשירי חשמל רבים, ולתופעות מגנטיות חשיבות מרובה להבנת מושגי יסוד במערכות אלקטרומגנטיות מורכבות. לפי עדויות אחדות הסינים השתמשו במצפן מגנטי כבר במאה ה-13 לפנה"ס. היוונים הכירו במאה השמינית לפנה"ס אבן בשם "מגנטיט" (תחמוצת ברזל, Fe_3O_4) שיצרה אינטראקציה עם ברזל. אחד הניסויים החשובים נעשה על ידי הצרפתי P.Maricourt ב-1269. הוא מצא שלסלע מגנטי בעל צורה גיאומטרית כדורית יש שני קטבים מגנטיים. מאוחר יותר, התברר שלכל מגנט יש שני

קטבים, תהא צורתו החיצונית אשר תהא. באיור 2 מוצגים מגנטים המשמשים להדגמות במעבדה לימודית לפיזיקה.



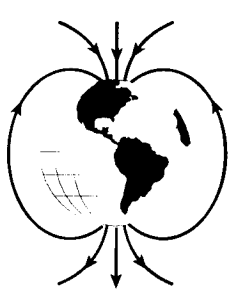
איור 2: מגנטים קבועים

מחט מגנטית, אם היא חופשית להסתובב סביב ציר אנכי, מתייצבת (כמעט)[1] בכיוון צפון-דרום. הקוטב שפונה לצפון הגיאוגרפי מכונה "הקוטב הצפוני" של המחט המגנטית, וסימונו "N", והקוטב האחר הוא הקוטב דרומי "S". זהו מצפן לכל דבר. בהמשך, מצפן זה ישמש אותנו לבדיקת קיומו וכיוונו של השדה המגנטי, בדומה לתפקיד המטען הבוחן בשדה החשמלי.



איור 3: מחט מגנטית יכולה להסתובב סביב ציר אנכי

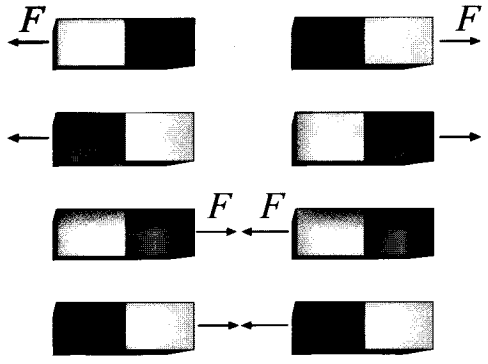
בשנת 1600 הציע W. Gilbert את הרעיון שכדור הארץ בעצמו הוא מעין מגנט ענק, (איור 4):



איור 4: עוצמת השדה המגנטי סביב כדור הארץ

[1] הקוטב הצפוני הגיאוגרפי והקוטב המגנטי אינם מתלכדים ממש. ההבחנה חשובה במקרים מסוימים, למשל לניווט טיסות, אך כאן נתעלם מהבדל זה.

בסדרת ניסויים שערך J. Michell ב- 1750, אישר שקטבים מגנטיים זהים דוחים זה את זה, וקטבים הפוכים נמשכים זה לזה. עוד הוא מצא שהכוחות המגנטיים מקיימים את חוק ריבוע המרחק, בדומה לכוחות שבין מטענים חשמליים.



איור 5: כוחות הדחייה והמשיכה בין מגנטים

למרות הדמיון בין כוחות מגנטיים לבין כוחות חשמליים ניתן להצביע על מספר הבדלים ביניהם: בעוד שניתן לבודד מטען חשמלי מסוג אחד, לא ניתן לבודד חד קוטב מגנטי – (monopol). הקטבים המגנטיים מופיעים בטבע בצמדים, זוגות צפון-דרום יחד. אם חותכים מגנט לשני חלקים, לכל אחד מהחלקים יהיה שוב קוטב צפוני וקוטב דרומי. מעובדה זו נגזרות מספר תכונות שמבדילות את הכוח והשדה המגנטיים מהכוח והשדה החשמליים, אותן נפרט בהמשך פרק זה.

ב-1819 גילה המדען והמרצה הדני ארסטד (H. C. Örsted) במהלך הרצאה, שהמצפן מושפע מקרבתו של זרם חשמלי. בהמשך, נחקרה תופעה זו ופותחה על ידי המדען הצרפתי אמפר (A.M. Ampère (1775-1836 שבנוסף לתופעה שהתגלתה על ידי ארסטד חקר גם את הכוחות המגנטיים הפועלים בין זרמים חשמליים.

ב-1820 מצא המדען האנגלי הדגול פארדיי (M. Faraday) קשרים נוספים בין זרמים חשמליים לכוחות מגנטיים ותרם תרומה מכרעת להתפתחות האלקטרומגנטיות. בין היתר, הוא בנה לראשונה דגם של מנוע חשמלי, שעתיד היה לשנות את פני העולם. ב-1873 ניסח מקסוול (J. C. Maxwell) את התיאוריה המדעית הכוללת של האלקטרומגנטיות, ובכך קנה לעצמו תהילת עולם. רבים משווים את תרומתו של מקסוול בתחום האלקטרומגנטיות, לזו של ניוטון בתחום המכניקה.

בפרק זה נעסוק בנושאים הבאים:

- השדה המגנטי ותכונותיו
- תנועת מטען חשמלי בשדה מגנטי
- הכוחות שפועלים בין שדה מגנטי לזרם חשמלי
- יישומים טכנולוגיים

7.2 תכונות השדה המגנטי

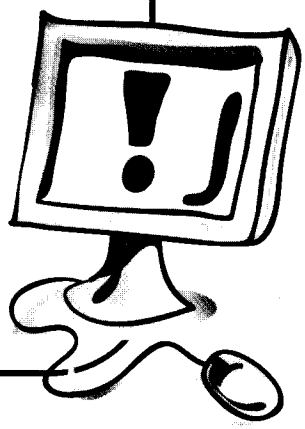
כפי שהשדה החשמלי מתאפיין בכל נקודה ונקודה על ידי וקטור עוצמת השדה החשמלי, בשדה המגנטי יש להתייחס לווקטור עוצמת השדה המגנטי. לשם הבנת כיוונו של עוצמת השדה החשמלי נעזרנו במטען בוחן; ציינו את כיוון הכוח שפעל עליו במקומות שונים במרחב, וכך הצלחנו למפות את כיוון עוצמת השדה החשמלי. העדר כוח חשמלי על מטען בוחן העיד על העדר שדה חשמלי .

בדומה למטען הבוחן, מצפן זעיר ממלא את תפקידו של המטען הבוחן למיפוי השדה המגנטי.

ראה הדגמה - השדה של מוט מגנטי

http://www.physicslessons.com/phe/phe.htm

Electrodynamics → "Magnetic Field of a Magnet Bar"



הנושא: מיפוי קווי שדה של מוט מגנטי.

שים לב לפרטים הבאים:

א. את כיוון השדה המגנטי ניתן למצוא בעזרת מצפן בוחן.

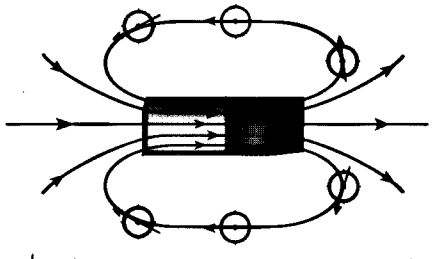
ב. המצפן הבוחן מתייצב במשיק לקווי השדה.

ג. קווי השדה המגנטי סגורים.

- אם המצפן אדיש, מעיד הדבר שהוא מוצב במקום שעוצמת השדה המגנטי בו היא אפס.
- במקום שבו קיים שדה מגנטי, מתייצב המצפן בכיוון עוצמת השדה המגנטי.
- כיוון עוצמת השדה המגנטי הוא הכיוון שאליו מופנה הקוטב הצפוני של המצפן הבוחן.

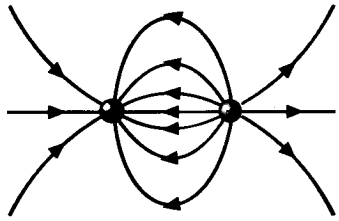
ניעזר בעקרונות אלה כדי למפות את השדה של מוט מגנטי.

נניע את המצפן הבוחן מסביב למגנט ונציין את כיוונו:



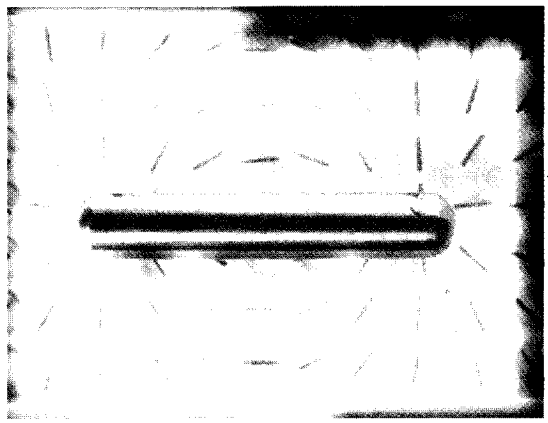
איור 6: קווי עוצמת השדה המגנטי משיקים לכיוון המצפן

קו השדה המגנטי משיק לכיוון עוצמת השדה המגנטי. יש לשים לב לכך שקו השדה המגנטי מחוץ למגנט מכוון אל הקוטב הדרומי, ואילו בתוך המגנט הוא מכוון לקוטב הצפוני.
קווי השדה המגנטי הם תמיד סגורים עקב העובדה שלכל מגנט יש שני קטבים. השדה המגנטי של מוט מגנטי דומה בצורתו לשדה החשמלי שנוצר על ידי שני מטענים חשמליים שווים בגודלם, אך מנוגדים בסימנם.



איור 7: קווי עוצמת השדה החשמלי של שני מטענים מנוגדים

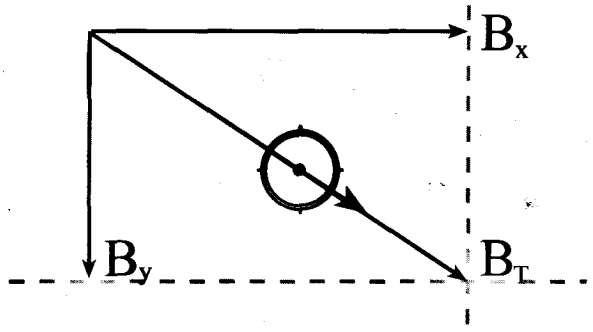
את קווי השדה המגנטי סביב מגנט אפשר להמחיש על ידי פיזור נסורת ברזל סביב מגנט. כל פיסת ברזל מתמגנטת, הופכת לדו קוטב מגנטי זעיר, ומתייצבת בהתאם לכיוון השדה המגנטי. בתצלום, אוסף מוטות ברזל זעירים שהפכו למגנטים זעירים, והתייצבו בהתאם לכיוון קווי השדה המגנטי מחוץ למוט המגנטי:



איור 8: מוטות ברזל משיקים לקווי השדה המגנטי

7.3 - השדה המגנטי של מספר מגנטים

השדה המגנטי הוא גודל וקטורי, וחלים עליו הכללים של החיבור הווקטורי ועיקרון הסופרפוזיציה. נסמן את עוצמת השדה המגנטי באות **B**. נניח שבתחום מסוים יש מפגש בין שני שדות: עוצמת השדה של האחד B_x וכיוונו x, ועוצמת השדה השני B_y וכיוונו y. המצפן מציין את כיוון עוצמת השדה השקול B_T:



איור 9: המצפן מתייצב בכיוון השדה השקול

בחרנו כאן מקרה פרטי להדגמת השקול של שני שדות מאונכים זה לזה.
באופן כללי:

$\vec{B}_T = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$, לכל ווקטור $\vec{B}$.

7.4 הכוח שפועל על מטען חשמלי בשדה מגנטי

מניסויים שונים מתברר שהשדה המגנטי מפעיל כוח על מטען חשמלי רק אם הוא נע בתוכו.
בסעיף זה נתאר את תכונות הכוח המגנטי שפועל על מטענים נעים כפי שהתבררו מאותם ניסויים:

- גודלו של הכוח המגנטי F_B פרופורציוני לגודלו של המטען q, לגודל מהירותו v, ולגודל עוצמת השדה המגנטי **B**, והוא תלוי גם בזווית שבין הווקטורים $\vec{B}$ ו-$\vec{v}$. אם ווקטור המהירות מקביל לווקטור השדה המגנטי, מתאפס הכוח F_B.

בנוסח אחר:

- כאשר מטען נע במקביל לעוצמת השדה המגנטי **B**, הכוח המגנטי F_B מתאפס.
- שלושת הווקטורים $\vec{v}, \vec{B}$ ו-$\vec{F}_B$ מאונכים זה לזה.
- הכוח המגנטי שפועל על מטען שלילי הפוך בכיוונו לכוח שפועל על מטען חיובי, אם שני המטענים נכנסים לאותו שדה מגנטי ובאותו כיוון.

ניתן לסכם זאת באופן הבא:

- הכוח[2] $\mathbf{F_B}$ מקיים $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$

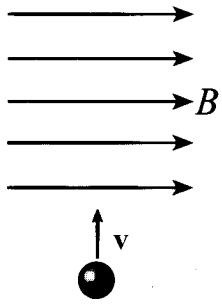
מכתיבה זו המבטאת מכפלה ווקטורית נובעים הדברים הבאים:

- כיוונו של הכוח $\mathbf{F_B}$ ניצב לשדה המגנטי ולרכיב מהירות המטען.
- גודל הכוח הפועל על המטען הנע מקיים:

$$|F_B| = |q| \cdot |v| \cdot |B| \cdot \sin\alpha$$

α הינה הזווית בין ווקטורים $\vec{B}$ ו-$\vec{v}$.

הטענה האחרונה מעוררת קושי. באיור הבא מתוארים כיווני וקטור השדה המגנטי B ווקטור המהירות v של מטען חיובי בעת כניסתו לשדה:



איור 10: מטען חיובי נכנס לשדה מגנטי אחיד. מהו כיוון הכוח המגנטי הפועל עליו בתנועתו בשדה?

אם וקטור הכוח $\mathbf{F_B}$ ניצב לשני הווקטורים המשורטטים, **B** ו- **v**, קיימות שתי אפשרויות:

א. וקטור הכוח "יוצא מהדף", כלומר הוא מופנה אל הקורא.

ב. וקטור הכוח "נכנס אל הדף".

במקרה המתואר באיור, האפשרות האחרונה היא הנכונה. כיוון הכוח המגנטי הפועל על המטען **החיובי** שבאיור הוא לתוך הדף. ניתן למצוא את כיוון הכוח בשיטה הנקראת **"כלל יד שמאל"**:

א. הנח את **ידך** באופן שהמטען החיובי יוצא מאצבעות יד **שמאל**.

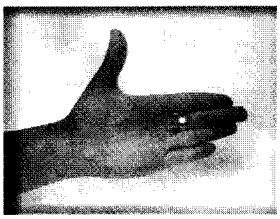
ב. סובב את היד עד שקווי עוצמת השדה חודרים לכף היד.

ג. כיוון הכוח המגנטי שפועל על מטען חיובי - בכיוון האגודל הפרוש.

ד. לגבי מטען שלילי, הכוח מכוון הפוך למגמת הכוח שפועל על מטען חיובי.

---

[2] "x" בביטוי המתמטי מציין מכפלה ווקטורית בין וקטור המהירות לווקטור השדה המגנטי.

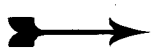


איור 11: כלל יד שמאל ראה סעיפים א-ד

היות ששלושת הווקטורים $\mathbf{F_B}$,**B** ו- **v** מאונכים זה לזה, מתקבל תמיד קשר תלת ממדי בין גדלים אלה. מצד שני, אנו משתמשים בתרשימים דו-ממדיים על דף המחברת או על הלוח. על מנת לסמן כיוון מאונך למישור התרשים, מקובלים הסימונים הבאים:

- "x" מסמן כיוון שנכנס לדף.
- "•" (נקודה) מסמנת כיוון שפונה אל הקורא - החוצה מהדף.
- שדה אחיד מסומן באמצעות מרווחים זהים בין הנקודות או ה - "x"- ים.

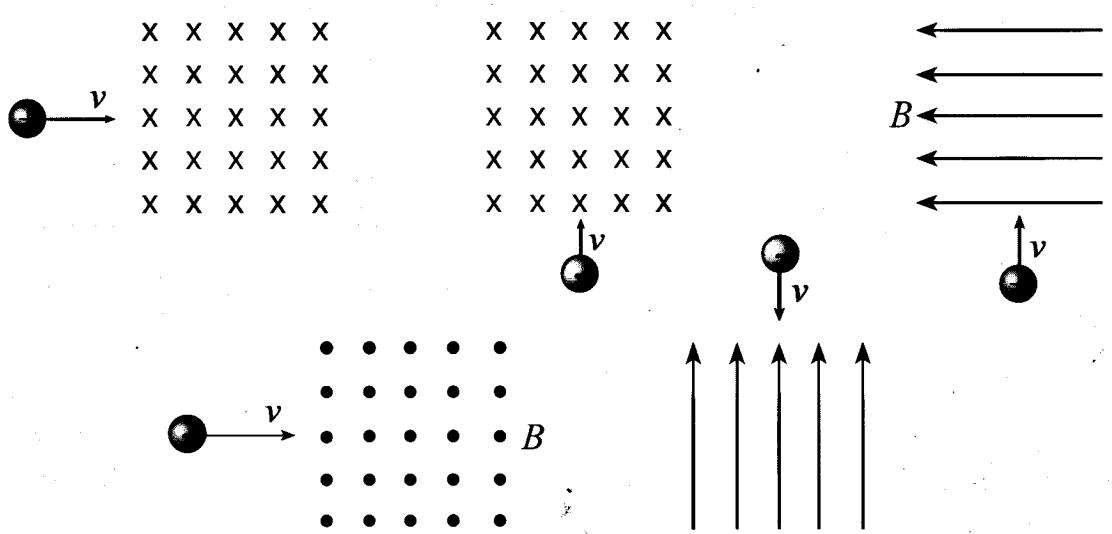
נקל לזכור את הסימון שתואר כאן, אם נחשוב על החץ המתואר באיור הבא:



איור 12: אם החץ מכוון אליך, אתה רואה נקודה "•" מתקרבת. אם החץ מתרחק ממך, אתה רואה את זנבו שהוא בצורת "x".

באיור 13 מתוארים שדות אחידים.

לפני שנעבור לעקרונות נוספים, מומלץ לברר האם כלל יד שמאל וצורות הסימון השונות הופנמו, ואין קשיים ביישומן. באיורים הבאים נראים מטענים כשהם נכנסים לשדה מגנטי. קבע בכל מקרה את כיוון הכוח המגנטי הפועל על המטענים ברגע כניסתם לשדה:



איור 13: קבע את כיוון הכוח המגנטי הפועל על המטענים

7.5 יחידת השדה המגנטי

יחידת המדידה של גודל עוצמת השדה המגנטי במערכת יחידות SI היא **טסלה** (Tesla), והיא תסומן 1T. היחידה נקראת על שם הפיסיקאי והממציא N.Tesla, שהטביע את חותמו על טכנולוגיות הקשורות בהובלת זרם חילופין **למרחקים**, כפי שיוסבר בפרק 9. את ההגדרה המדעית נדחה לעת עתה, אך נוכל להבין את משמעותה של יחידה זו אם נתבונן במשוואה:

$$F_B = Bqv$$

$$B = \frac{F_B}{qv}$$

(במשוואות אלה הנחנו שווקטור המהירות מאונך לווקטור עוצמת השדה המגנטי).
מניתוח המשוואה האחרונה עולה שיחידת עוצמת השדה המגנטי היא:

$$Tesla = \frac{N}{C \cdot (m/s)} = \frac{N}{A \cdot m}$$

מכאן ניתן לייחס את הפירוש הבא ליחידת השדה המגנטי "טסלה":

- **על מטען חשמלי נקודתי בגודל 1C הנע במהירות 1m/s בניצב לשדה מגנטי שעוצמתו 1T פועל כוח מגנטי בשיעור 1N.**

כאשר נרחיב בהמשך פרק זה עוד בנושא הכוח המגנטי הפועל על זרם חשמלי בסעיף 7.7 בפרק זה נגלה שניתן להגדיר את הטסלה גם בצורה אחרת:

- **על תייל שאורכו 1m הנמצא בשדה מגנטי שעוצמתו 1T פועל כוח בשיעור 1N, אם דרך התייל זורם זרם של 1A** (אם הזרם ווקטור השדה המגנטי מאונכים).

כפי שנראה בהמשך, שתי הגדרות אלה שקולות זו לזו.

לשם המחשה, נציין שעוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ היא כ-$5\cdot10^{-5}$ טסלה[3], ועוצמתם של מגנטים במעבדה היא בתחום $2 - 10^{-3}$ טסלה, תלוי בסוג המגנט.

קיימת יחידה נוספת לעוצמת השדה המגנטי הנקראת גאוס[4], סימנה 1G. הקשר בין יחידה זו ליחידת הטסלה הוא: $1\text{Gauss} = 10^{-4}\text{T}$.

---

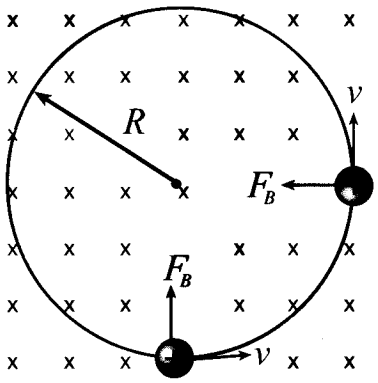
[3] הערך משתנה ממקום למקום על פני כדור הארץ.

[4] לכבודו של Gauss. זו יחידה השייכת לקבוצת יחידות המכונות "cgs", ראשי התיבות באנגלית של הגדלים סנטימטר, גרם, שנייה.

7.6 תנועת מטען בשדה מגנטי אחיד

בסעיף הקודם ציינו שהכוח המגנטי ניצב למהירות תנועתו של המטען, וניצב לווקטור השדה המגנטי. נבחן עתה את צורת מסלולו של מטען הנע בשדה מגנטי אחיד, כאשר המהירות ניצבת לכיוון השדה המגנטי.

באיור 14 מוצג מטען חשמלי +q הנע בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו $\bar{B}$. השדה מכוון לתוך הדף, כמתואר באיור.



איור 14: מטען בשדה מגנטי אחיד נע בתנועה מעגלית.

חשוב להבין שכיוון מהירות המטען משתנה כי הכוח המגנטי גורם לתאוצה רדיאלית, אך הכוח המגנטי יהיה שוב מאונך למהירות. כוח מגנטי לעולם לא יוכל לגרום לתאוצה משיקית, היות שאין לו רכיב בכיוון התנועה, לכן המטען ינוע בתנועה מעגלית קצובה, כלומר במהירות קבועה בגודלה.

ראה הדגמה - תנועת מטענים בשדה מגנטי אחיד:

http://webphysics.ph.msstate.edu/javamirror/ipmj/java/partmagn/index.html

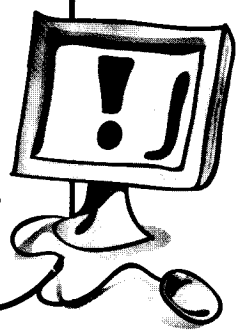
"Charged Particles Moving in a Magnetic Field"

בהדמיה ניתן לראות את מסלול תנועתם של מטענים בשדה מגנטי אחיד.

http://www.surendranath.org

/Applets/Electricity/MovChgEleMag/MovChgEleMagApplet.html

בהדמיה ניתן לצפות במסלול תנועתו של מטען של חלקיק הנע בשני אזורים בהם שורר שדה מגנטי אחיד. ניתן לשנות את עוצמות השדות, ואת מהירות המטען.



הכוח המגנטי הוא הכוח היחיד הפועל על המטען, לכן לפי החוק השני של ניוטון מתקיים:

$$F_B = ma$$

$$F_B = Bqv = \frac{mv^2}{R}$$

מכאן שרדיוס המעגל שמהווה את מסלול המטען הוא:

$$R = \frac{mv}{Bq}$$

זמן המחזור של תנועת המטען ניתן על ידי:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{Bq} = \frac{2\pi m}{Bq}$$

והמהירות הזוויתית היא:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \frac{Bq}{2\pi m} = \frac{Bq}{m}$$

מסקנה: זמן המחזור והמהירות הזוויתית אינם תלויים במהירות המטען או ברדיוס המעגל שלאורכו הוא נע.

דוגמה 1

פרוטון נע במהירות שהיא מאית ממהירות האור בריק[1], c, בשדה מגנטי שעוצמתו 0.1T.

חשב את:

א. רדיוס הסיבוב של הפרוטון.

ב. זמן המחזור של תנועתו.

<u>פתרון:</u>

נתונים:

מסת הפרוטון $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$

מטען הפרוטון $q_p = +e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$

מהירות הפרוטון $v = \frac{c}{100} = 3 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$

עוצמת השדה המגנטי $B = 0.1T$

[1] מהירות האור בריק הינה $c = 3 \cdot 10^8 m/s$.

דוגמה 1 - המשך:

א. לפי החוק השני של ניוטון:

$$\Sigma F = Bqv = \frac{mv^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{Bq} = \frac{1.67 \cdot 10^{-27}\,kg \cdot 3 \cdot 10^{6}\,m/s}{0.1T \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}\,C} \approx 0.3m$$

כל הנתונים הוצבו ביחידות SI, ולכן התשובה מתקבלת ביחידות SI.

ב. את זמן המחזור נמצא מהקשר:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi mv}{Bqv} = \frac{2\pi m}{Bq}$$

$$T = \frac{2\pi \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}\,kg}{0.1T \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}\,C} \approx 2\pi \cdot 10^{-7}\,s$$

דוגמה 2:

אלקטרון שהואץ ממנוחה בהפרש פוטנציאלים 200V, נכנס בניצב לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו $B = 10^{-3}\,T$. חשב את רדיוס הסיבוב של האלקטרון.

<u>פתרון:</u>

מתח ההאצה $V = 200Volt$

מטען האלקטרון $e = 1.6 \cdot 10^{-19}\,C$

מסת האלקטרון $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31}\,kg$

עוצמת השדה המגנטי $B = 10^{-3}\,T$

דוגמה 2 - פתרון

נחשב תחילה את מהירות האלקטרון:

$$V \cdot e = \frac{mv^2}{2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2V \cdot e}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (200V) \cdot (1.6 \cdot 10^{-19} C)}{9.11 \cdot 10^{-31} kg}} = \sqrt{0.702 \cdot 10^{14}} = 8.38 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$$

הכוח המגנטי הפועל על האלקטרון מאונך בכל עת למהירותו, לכן מתקיים:

$$Bev = \frac{mv^2}{R}$$

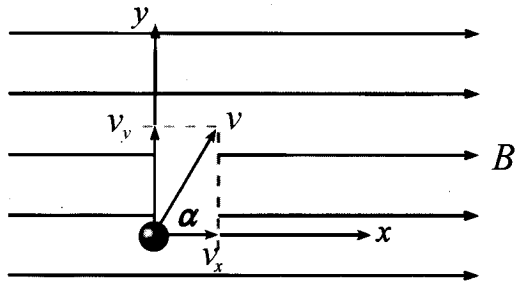
$$R = \frac{mv}{Be}$$

לכן

$$R = \frac{9.11 \cdot 10^{-31} kg \cdot 8.38 \cdot 10^6 m/s}{10^{-3} T \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} C} = 4.77 \cdot 10^{-2} m = 4.77 cm$$

עד כה התייחסנו למטען הנע בניצב לשדה המגנטי. נרחיב את הדיון למקרה נוסף, כאשר המהירות אינה ניצבת לווקטור השדה המגנטי. נתייחס למקרה הבא:

- שדה מגנטי אחיד שעוצמתו $\vec{B}$ מכוון לכיוון x+ .
- מטען חיובי נכנס לשדה במהירות v בזווית α ביחס לכיוון וקטור השדה המגנטי, כמתואר באיור 15:



איור 15: כניסת חלקיק טעון לשדה מגנטי אחיד בזווית

נרצה לברר מהו מסלול תנועתו של מטען זה בשדה המגנטי.

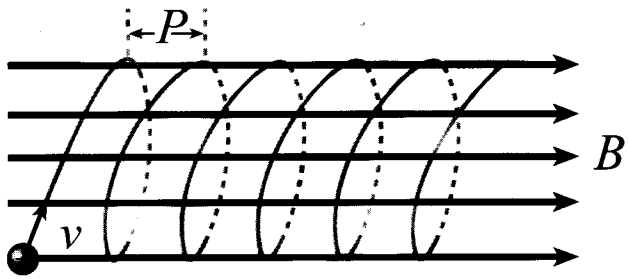
במצב המתואר נוח לפרק את וקטור המהירות לרכיבים: v_x הוא רכיב המהירות בכיוון השדה $\vec{B}$ ו-v_y הוא רכיב מאונך לכיוון השדה.

עתה ניתן לראות את תנועת המטען בשדה המגנטי כצירוף של שתי תנועות בלתי תלויות:

א. הרכיב v_y גורם לתנועה מעגלית קצובה במישור מאונך ל-$\vec{B}$ בהתאם למה שהוסבר בראשית סעיף זה.

ב. הרכיב v_x גורם לתנועה קצובה בכיוון השדה $\vec{B}$. נזכיר שאין אינטראקציה מגנטית כאשר מהירות המטען מקבילה לכיוון השדה המגנטי.

ג. צירוף שתי התנועות הללו יוצר מסלול בורגי (helix), כמתואר באיור הבא:
p, המרחק בין שתי הברגות סמוכות, נקרא "פסיעת הבורג".



איור 16: מסלול בורגי של מטען בשדה מגנטי אחיד.

ראה הדגמייה - תנועה בורגית של ניטען חשמלי בשדה מגנטי אחיד:

http://physics.bu.edu/~duffy/semester2/c12_helix.html

"Possible Paths of Charge in Uniform Magnetic Field"

תנועה בורגית או מעגלית; * אפשר שילוב שדה מגנטי ושדה חשמלי

http://www.surendranath.org/Applets/Electricity/MovChgEleMag/MovChgEleMagApplet.html

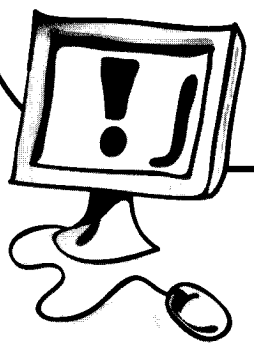
בהדמיה ניתן לראות תנועת מטען במקום בו שורר שדה חשמלי ושדה מגנטי. ניתן לאפס את השדה החשמלי ולצפות בתנועה בורגית.

הנחיות להפעלת ההדגמייה:

בשלוש ההרצות הראשונות בחר את הערכים המופיעים בטבלה הבאה:

B_Z	B_Y	B_X	E_Z	E_Y	E_X	V_Z	V_Y	V_X	Z	Y	X	הרצה מספר
1.5	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	1
1.5	0	0	0	0	0	5	0	50	0	0	0	2
1.5	0	0	0	0	0	10	0	50	0	0	0	3

להדמיה זו יכולות רבות, נסה אפשרויות נוספות. ניתן לשלב גם שדה חשמלי. אתה מוזמן לחזור להדמיה זו בעת פתרון תרגילים בנושא תנועת מטען בשדה חשמלי, בשדה מגנטי או שילוב בין שדות אלה.



דוגמה 3:

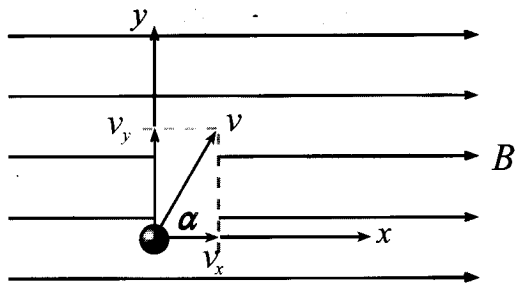
חלקיק טעון במטען q+ נכנס לשדה מגנטי אחיד במהירות v. מסת החלקיק היא m וכיוון תנועתו יוצר זווית α עם השדה B. במקרה זה נע המטען במסלול בורגי.

בטא באמצעות נתוני השאלה את הגדלים הבאים:

א. רדיוס המסלול של החלקיק.

ב. הזמן הדרוש להשלמת סיבוב אחד.

ג. פסיעת הבורג, p.



בזווית לשדה המגנטי

פתרון:

נפרק את וקטור המהירות לשני רכיבים: v_x מכוון בכיוון השדה המגנטי B, ו-v_y ניצב לו.

$$v_y = v\sin\alpha \quad ; \quad v_x = v\cos\alpha$$

א. רכיב המהירות v_y, גורם למטען לנוע במעגל ברדיוס:

$$R = \frac{mv_y}{Bq} = \frac{mv\cdot\sin\alpha}{Bq}$$

ב. זמן המחזור הוא:

$$T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

כפי שהראינו בדוגמה 1.

ג. פסיעת הבורג היא המרחק שהמטען מתקדם בציר האופקי x במשך זמן מחזור אחד. בציר זה המהירות קבועה בערכה v_x, לכן:

$$p = v_x T = v_x \frac{2\pi m}{Bq} = \frac{2\pi m v_x}{Bq} = \frac{2\pi m v\cdot\cos\alpha}{Bq}$$

נסכם את הדומה ואת השונה בין השדה המגנטי לבין השדה החשמלי:

השדה החשמלי	השדה המגנטי
▪ השדה החשמלי מפעיל כוח על מטען בכל מקרה, בין אם הוא במנוחה ובין אם הוא בתנועה.	▪ השדה המגנטי מפעיל כוח אך ורק על מטען חשמלי הנמצא בתנועה.
▪ כיוון הכוח החשמלי הפועל על מטען חשמלי הוא במקביל לעוצמת השדה החשמלי.	▪ הכוח המגנטי פועל בניצב לכיוון השדה המגנטי ובניצב למהירות המטען.
▪ (הכוח של) השדה החשמלי משנה את גודל המהירות של המטען, על כן האנרגיה הקינטית של המטען משתנה. לחילופין, (כוח) השדה החשמלי מבצע עבודה על מטען הנע בתוכו.	▪ הכוח של השדה המגנטי פועל בניצב לכיוון תנועת המטען, על כן הוא משנה את כיוון תנועתו, אך אינו משנה את גודל המהירות של המטען. ▪ לחילופין, הכוח של השדה המגנטי אינו משפיע על האנרגיה הקינטית של מטען הנע בתוכו; הוא אינו מבצע עליו עבודה.

שאלה למחשבה

הבא דוגמה מתחום המכניקה לגוף נע עליו פועל כוח, אך האנרגיה הקינטית של הגוף אינה משתנה.

7.7 יישומים של **תנועת** מטענים חשמליים בשדה מגנטי

בסעיף זה נדון בארבעה יישומים חשובים של תנועת מטענים בשדה מגנטי:

א. הניסוי שבו נמדד לראשונה היחס בין מטען האלקטרון למסתו (e/m).

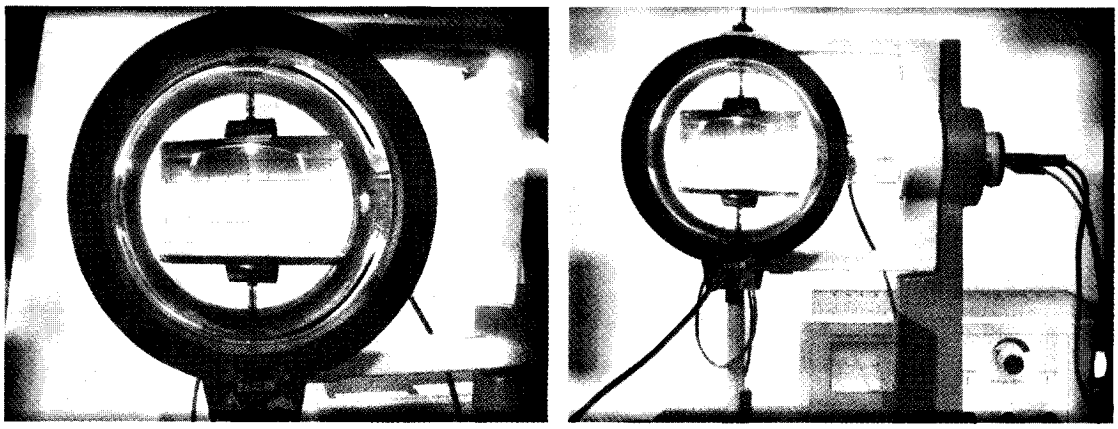
ב. **ספקטרומטר מסות** - (mass spectrometer) מכשיר שבעזרתו ניתן למדוד בדיוק רב מסות של אטומים ושל מולקולות.

ג. נתאר את הציקלוטרון של Lawrence - מאיץ חלקיקים מעגלי.

ד. אפקט Hall - כלי למדידת העוצמה של שדה מגנטי.

א. מדידת היחס e/m של אלקטרון

שפופרת הריק המתוארת באיור 18 היא גרסה מודרנית לניסוי המפורסם שביצע J.J.Thomson ב-1897. בניסוי זה נקבע לראשונה המטען הסגולי[6] של האלקטרון. אלקטרונים שהואצו במתח V נכנסים לשדה מגנטי אחיד. כיוון השדה $\vec{B}$ בניצב למהירות האלקטרונים. בתצלום נראית קשת מעגלית; קשת זו נוצרה כתוצאה מפגיעת אלקטרונים בלוח פלואורסצנטי אשר הוצב בדרכם של האלקטרונים הנעים במסלול מעגלי.



אלקטרונים הנעים

בשדה מגנטי. הקשת המאירה נוצרת על ידי פגיעת האלקטרונים בלוח פלואורסצנטי.

[6] היחס בין מטען האלקטרון לבין מסתו מכונה "המטען הסגולי".

רדיוס תנועת האלקטרון R מקיים את הקשר :

$$R = \frac{m_e v}{B q_e} = \frac{m_e v}{B e}$$

e ו-m_e הם גודל מטען האלקטרון ומסתו. גודל ערכה של עוצמת השדה B המגנטי ידוע מנתוני מערכת הניסוי. **בהנחה שמהירות האלקטרונים שנפלטו ניתנת להזנחה**,המהירות v של האלקטרונים שהואצו במתח V מחושבת מהקשר:

$$e \cdot V = \frac{m_e v^2}{2}$$

רדיוס מסלול האלקטרונים R נמדד בניסוי. צרוף שתי המשוואות האחרונות מניב ביטוי שמקשר את הגדלים הידועים עם ערך המטען הסגולי $\frac{e}{m_e}$ על פי הקשר הבא:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2V}{B^2 R^2}$$

מספר שנים מאוחר יותר, ב-1913 מצא Millikan[7] בניסוי טיפות השמן את מטען האלקטרון, ומכאן ואילך נודעו בנפרד ערכי מסת האלקטרון ומטענו.

ב. ספקטרומטר מסות - Mass spectrometer

ספקטרומטר מסות הוא מכשיר שמאפשר למדוד את מסתם של אטומים מיוננים[8] ומולקולות מיוננות. לראשונה פותח המכשיר בשנת 1919 על ידי F.Aston, ומאוחר יותר שופר על ידי K. Bainbridge. בין היתר, בכוחו של ספקטרומטר המסות לזהות איזוטופים שונים של אותו יסוד, על ידי מדידה מדויקת של מסתם. נתאר את עיקרון פעולתו.

ספקטרומטר מסות מורכב משלושה חלקים עיקריים:

א. מאיץ יונים - זהו אזור בו שורר שדה חשמלי אחיד, המוכר מהפרקים הקודמים, על כן לא נפרט חלק זה.

ב. בורר מהירויות.

ג. אזור שמפריד בין היונים.

---

[7] הניסוי תואר בספר בחלק א', בפרק 5 הדן בפוטנציאל החשמלי.

[8] אטומים שנוספו להם או שנגרעו מהם אלקטרון אחד או יותר.

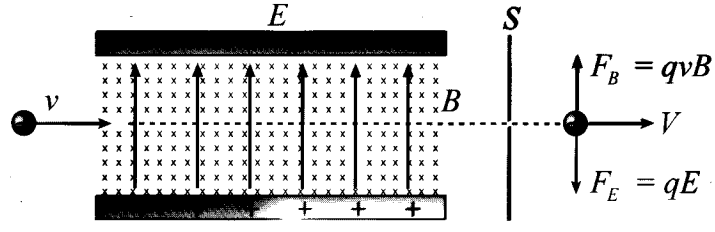
ב. נתאר את עיקרון פעולתו של בורר המהירויות:

יונים בעלי מטענים שווים אך בעלי מהירויות שונות, אשר הואצו במאיץ היונים, נכנסים לבורר המהירויות. בחלק זה של המכשיר קיימים שדה חשמלי ושדה מגנטי $\vec{E}$ ו- $\vec{B}$ בהתאמה, מאונכים זה לזה ומאונכים גם למהירות $\vec{v}$ של כל יון כמתואר באיור. הכוחות שפועלים על היון הם כוח חשמלי קבוע שגודלו Eq וכוח מגנטי בגודל Bqv שתלוי במהירותו של היון. כאשר שני כוחות אלה שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, היון נע לאורך קו ישר. לפיכך יונים שעוברים את הצמצם S מקיימים:

$$Bqv = Eq$$

ולכן הם בעלי מהירות זהה:

$$v = \frac{E}{B}$$



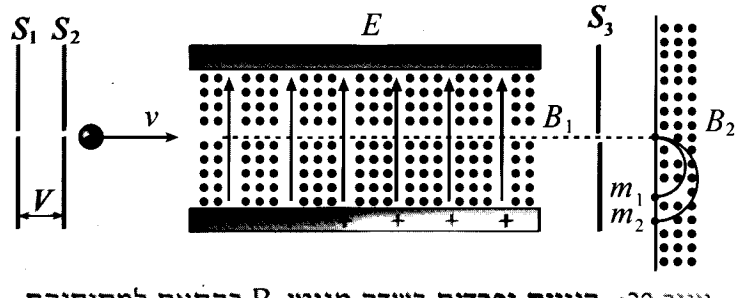
איור 19: עיקרון הפעולה של בורר מהירויות

ג. אחרי צאתם מהצמצם המטענים ממשיכים לנוע בשדה מגנטי אחיד B_2, לכן תנועתם תהיה מעגלית לפי החוקיות הבאה:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{Bq} = m\frac{v}{Bq}$$

כלומר, היון שמסתו גדולה יותר ינוע במעגל ברדיוס גדול יותר.



איור 20: היונים נפרדים בשדה מגנטי B_2 בהתאם למסותיהם

בתערובת טבעית של אטומי המימן בה מצויים שלושה איזוטופים שונים של מימן, לכל אחד מהיונים שעובר את בורר המהירויות יש ערך $\frac{v}{Bq}$ זהה. לפיכך, הכבד שבהם נע במעגל בעל רדיוס סיבוב גדול ביחס ליוני האיזוטופים האחרים. אחרי השלמת חצי סיבוב המטען פוגע בלוח צילום, או בחיישן מסוג אחר שמתעד את מקום פגיעתו. מהעקבות על לוח הצילום ניתן לקבוע את רדיוס הסיבוב של כל יון ועל פי הקשר האחרון אפשר למצוא את מסתו. לבסוף נעיר שתנועת המטענים במכשיר מתבצעת באזורים בהם שורר ריק (וואקום), כדי להימנע מאיבוד אנרגיה על ידי התנגשויות עם מולקולות אוויר.

ג. מאיצים מעגליים - הציקלוטרון

תהליך גרעיני מתחיל בהפצצת גרעין האטום בחלקיקים מהירים מאוד. אחת הדרכים להביא חלקיקים למהירות זו מושגת במעבדה באמצעות מאיצי חלקיקים. נתאר מאיצי חלקיקים ברמה העקרונית. עיקר השימוש במאיצים הוא במחקר הקשור במבנה התת-אטומי של החומר.

מאיץ החלקיקים המעגלי הגדול ביותר הוא מאיץ מעגלי ענק בשם CERN[9] שעל גבול שוויצריה-צרפת קרוב לעיר Geneva. המאיץ נבנה בשנת 1981. מסלול ההאצה המעגלי נמצא במנהרה תת קרקעית באורך של כ – 27 ק"מ. החלקיקים מואצים בו למהירות שהיא למעלה מ- 99% ממהירות האור[10]. כדי שחלקיקים טעונים ינועו בתנועה מעגלית, המתקן מצויד בשדה מגנטי שעוצמתו ניתנת לשינוי, בהתאם לחלקיקים המואצים, והיא מותאמת לקשר $R = \frac{mv}{Bq}$.

שאלה למחשבה בקשר למאיץ של CERN:

א. מהו גודלו של השדה המגנטי שדרוש במאיץ של CERN עבור פרוטון שמהירותו 10% ממהירות האור?

ב. פי כמה חזק שדה מגנטי זה מהשדה המגנטי של כדור הארץ?

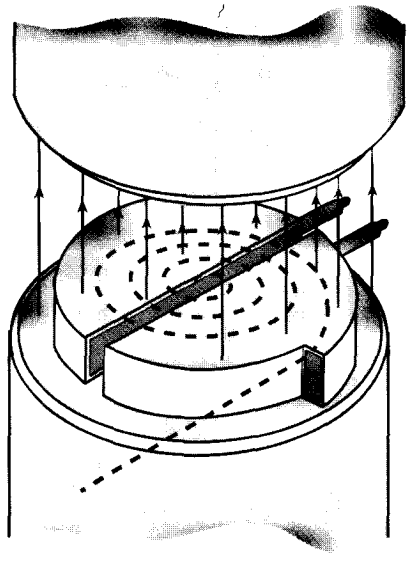
ג. האם הפיזיקאים של CERN צריכים להתחשב בשדה המגנטי של כדור הארץ?

---

[9] ראה אתר: http://pdg.web.cern.ch/pdg/cpep/adventure_home.html

[10] במהירויות אלה, יש ליישם שיקולים הנובעים מתורת היחסות. בתיאורים בהמשך נתעלם משיקולים אלה.

נתאר כאן מאיץ מעגלי צנוע בהרבה, שהומצא בשנת 1931 על ידי הפיזיקאי E .Lawrence בארה"ב. מאיץ זה נודע בשם "ציקלוטרון" (Cyclotron).
באיור מצורף תיאור המכשיר.



איור 21: הציקלוטרון

במאיץ זה יש שדה מגנטי ושדה חשמלי. תפקידו של השדה המגנטי לגרום לחלקיקים הטעונים לנוע בתנועה מעגלית – שדה זה מתואר באיור על ידי חיצים אדומים מכוונים מעלה, בניצב למהירותם של החלקיקים. שדה חשמלי מאיץ את החלקיקים בעוברם בין שני חלקי המכשיר כפי שמתואר בהמשך.

שני חלקי המכשיר המכונים "D" עשויים מתכת והם מחוברים למקור מתח חילופין שמשנה את קוטביותו בכל פעם שהמטען המואץ מגיע למרווח שבין שני ה-"D"-ים. כך מואץ המטען פעמיים בכל סיבוב. V - מציין את המתח בין חלקי המכשיר, ו-q הוא מטענו של החלקיק המואץ. מנת האנרגיה המוענקת לו במעבר בין שני המרווחים היא $V \cdot q$. לכן, בכל סיבוב שלם האנרגיה של החלקיק גדלה ב-$2Vq$. היות שכל מטען מסתובב פעמים רבות במכשיר, די במתחי האצה יחסית נמוכים, וזה יתרונו של הציקלוטרון על פני מאיצים קוויים. במהלך תנועת המטען בכל "D" גודל מהירותו קבוע. שינוי גודל המהירות מתבצע אך ורק במרווחים שבין שני ה"D"-ם. רדיוס הסיבוב

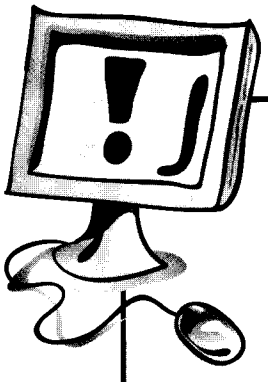
תלוי במהירות החלקיק, והוא גדל בכל פעם שהמטען חולף במרווח. נזכיר שהשדה המגנטי אינו מבצע עבודה, הוא רק מספק את הכוח המרכזי כדי ליצור תנועה מעגלית.

עוד נזכיר שזמן המחזור של הסיבוב בציקלוטרון הוא קבוע,[11] והוא אינו תלוי ברדיוס הסיבוב:

$$R = \frac{mv}{Bq}$$

$$T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

המתח המאיץ מחליף את קוטביותו כל חצי סיבוב, כלומר בפרק זמן של $\Delta t = \frac{T}{2}$. המהירות הסופית, המרבית, של המטען תלויה ברדיוס בו הוא עוזב את המכשיר, כלומר ברדיוס הציקלוטרון.



ראה הדגמה:

ציקלוטרון - 1

http://physics.bu.edu/~duffy/semester2/c13_cyclotron.html

בהדמיה ניתן לראות את תנועת המטען המואץ ואת האנרגיה (לחץ "show energy") הנוספת לו בכל מעבר בין חלקי המכשיר. שים לב, האנרגיה גדלה רק במרווח בין חלקי המכשיר. הפרופורציות בין רדיוס הציקלוטרון לבין המרווח בין חלקיו מוגזמות, אף על פי כן זו המחשה חשובה.

ציקלוטרון - 2

http://www.schulphysik.de/ntnujava/cyclotron/cyclotron.html

באתר ניתן לראות את כיוון הכוח הפועל על החלקיק בעת תנועתו ואת השתנות גודל המהירות במעבר בין שני חלקי הציקלוטרון.

[11] אם מתעלמים משינוי יחסותי של המסה ומהזמנים בהם נמצא החלקיק בשדה החשמלי במרווח שבין ה- "D"- ים.

דוגמה 4:

רדיוס ציקלוטרון הוא 0.5m, ועוצמת השדה המגנטי בו B = 2T. מתח ההאצה בין חלקי ה-"D" הוא 1kV.

א. חשב את מהירותו של פרוטון שהואץ בציקלוטרון זה.

ב. חשב את זמן המחזור של תנועת הפרוטון ואת תדירות מתח החילופין בציקלוטרון.

ג. חשב את מספר הסיבובים שהשלים הפרוטון עד צאתו מהציקלוטרון.

<u>פתרון:</u>

נתון:

$$R_{max} = 0.5m$$
$$B = 1T$$
$$m = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$$
$$q = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$
$$V = 10^3 Volt$$

א. נחשב את מהירות הפרוטון:

$$R_{max} = \frac{mv_{max}}{Bq}$$

מכאן נובע:

$$v_{max} = \frac{BqR_{max}}{m}$$

$$v_{max} = \frac{1 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.5}{1.67 \cdot 10^{-27}} = 4.79 \cdot 10^7 \frac{m}{s} \approx 0.16c$$

ב. חישוב זמן המחזור:

$$T = \frac{2\pi m}{Bq} = \frac{2\pi \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}}{1 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} = 6.55 \cdot 10^{-8} s = 655 \mu s$$

דוגמה 4 – המשך:

תדירות הציקלוטרון היא $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6.55 \cdot 10^{-8}} = 1.53 \cdot 10^{7}\,Hz = 15.3\,MHz$.

הערה: תדירות סיבוב הפרוטון ותדירות מתח החילופין זהה. מתח הציקלוטרון משנה את קוטביותו פעם בסיבוב, דבר המבטיח האצת הפרוטון בכל מעבר בין חלקי המכשיר.

ג. בכל סיבוב הפרוטון קיבל שתי "בעיטות" מהשדה החשמלי, ובכל "בעיטה" נוספה לו אנרגיה של Vq או ב-n סיבובים, $n \cdot 2Vq$ לכן:

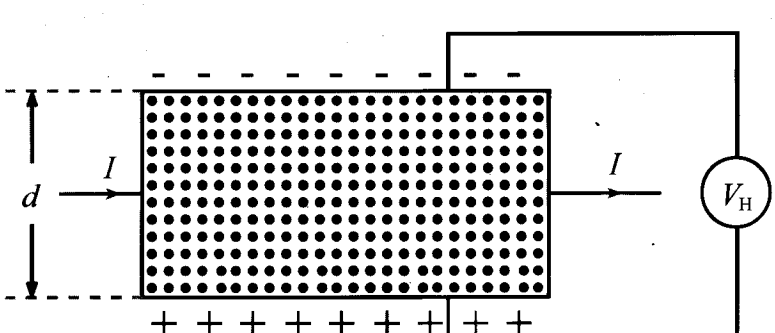
$$n \cdot 2Vq = E_{k\max} = \frac{m(v_{\max})^2}{2}$$

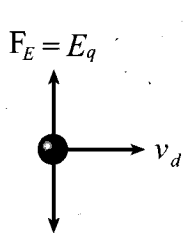
$$n = \frac{m(v_{\max})^2}{4Vq} = \frac{1.67 \cdot 10^{-27} \cdot (4.79 \cdot 10^{7})^2}{4 \cdot 10^{3} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} = 5.99 \cdot 10^{3} = 5990$$

מכאן שהחלקיק משלים 5990 סיבובים במהלך האצתו בציקלוטרון!

ד. אפקט Hall (הרחבה ניעבר לתכנית הליימודים)

כאשר מוליך שזורם בו זרם נמצא בשדה מגנטי, נוצר בו קיטוב חשמלי עקב הכוחות המגנטיים שפועלים על המטענים הנעים. כתוצאה מהקיטוב נוצר מתח בין צידי המוליך. נסמן מתח זה V_H (ראה איור 22).





איור 22: קטע של מוליך הנמצא בשדה מגנטי וזורם בו זרם. במוליך זה האלקטרונים החופשיים מתרכזים בחלק העליון של המוליך. כתוצאה מזה נוצר קיטוב במוליך הגורם להפרש פוטנציאלים V_H בין צידי המוליך.

גודלו של המתח V_H פרופורציוני לגודל עוצמת השדה המגנטי, על כן אפקט הול משמש בין היתר למדידת עוצמת שדה מגנטי. נתייחס למדידת עוצמת השדה המגנטי בשיטה זו בקצרה.

נזכיר את הביטוי שמקשר את עוצמת הזרם I במוליך עם מהירות הסחיפה v_d שפיתחנו בפרק 2: עוצמת הזרם במוליך מבוטאת במשוואה הבאה:

$$I = nAv_d e$$

את עוצמת הזרם I ניתן למדוד, שטח חתך המוליך A, וצפיפות המטענים ליחידת נפח, n, הם קבועים הידועים מנתוני המוליך, e הוא מטען האלקטרון, וכך אפשר לחשב את מהירות הסחיפה.

הכוחות שפועלים על המטענים הם:

כוח המופעל על ידי השדה מגנטי:

$$F_B = Bqv$$

וכוח השדה החשמלי שהוא תולדה של הקיטוב:

$$F_E = Eq = \frac{V_H}{d} \cdot q$$

הערך d במשוואה האחרונה הוא רוחב המוליך שניצב לשדה המגנטי.

משוויון הכוחות על המטענים ומהצבת הביטוי לזרם הסחיפה במשוואה האחרונה מתקבל:

$$B = \frac{V_H}{d \cdot v} = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{nAe}{d}$$

באגף ימין של הביטוי האחרון כל הגדלים ידועים, המתח והזרם נמדדים ישירות, ולכן זו שיטה למדידת עוצמת שדה מגנטי.

דוגמה 5:

מוליך נחושת מוכנס לשדה מגנטי כדי למדוד את עוצמתו באמצעות אפקט הול. צורתו הגיאומטרית של מוליך הנחושת היא תיבה שממדיה (5cm)x(1cm)x(0.2cm). עוצמת הזרם במוליך היא 2.5A. צפיפות האלקטרונים החופשיים של נחושת היא $n = 8.5 \cdot 10^{28} \frac{1}{m^3}$. המתח הנמדד בוולטמטר רגיש הוא $V_H = 5 \cdot 10^{-7} V$.

התיבה הוכנסה לשדה המגנטי כך ש- d = 5cm. **חשב את עוצמת השדה המגנטי.**

דוגמה 5 - פתרון:

$$B = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{nAe}{d} = \frac{5 \cdot 10^{-7} V}{2.5 A} \cdot \frac{(8.5 \cdot 10^{28} \frac{1}{m^3})(1 \cdot 10^{-2} m)(0.2 \cdot 10^{-2} m) \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} C}{5 \cdot 10^{-2} m} = 1.09T$$

7.8 הכוח שמפעיל שדה מגנטי על זרם

נתייחס לתייל מוליך ששטח החתך שלו הוא A ואורכו L. נפח התייל הוא V = A·L. צפיפות האלקטרונים החופשיים במוליך היא n אלקטרונים ליחידת נפח; לכן מספר האלקטרונים החופשיים הוא N = nAL . כל אלקטרון חופשי נע במהירות ממוצעת v_d (מהירות הסחיפה). הכוח המגנטי שפועל על התייל כולו הוא סכום הכוחות המגנטיים הפועלים על כל האלקטרונים החופשיים שבו. נבטא זאת במשוואה הבאה:

$$F_{B(conductor)} \text{ על התייל} = N \cdot F_B \text{ על אלקטרון}$$

נציב את מספר האלקטרונים החופשיים ואת הכוח המגנטי שפועל על כל אלקטרון ומתקבל:

$$F_B \text{ על התייל} = nAL \cdot Bev_d = B(neAv_d) \cdot L$$

בפרק 2 בכרך א' הראנו את הקשר בין עוצמת הזרם החשמלי לבין מהירות הסחיפה:

$$I = neAv_d$$

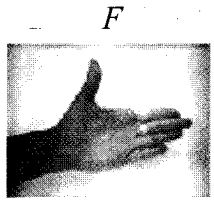
משני הקשרים הללו מתקבל הקשר שמבטא את הכוח המגנטי הפועל על תייל באורך L, שבו עוצמת הזרם היא I:

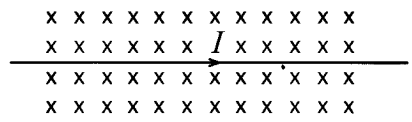
$$F = BIL$$

הערה:

כיוונו של הכוח המגנטי הפועל על תייל דרכו זורם זרם חשמלי הוא בהתאם לכלל יד שמאל, לכן הביטוי הכללי הוא: $F = BIL\sin\alpha$. α היא הזווית בין כיוון הזרם לבין עוצמת השדה המגנטי.

לכיוון הזרם יש להתייחס כאל כיוון תנועתו של מטען חיובי - ראה איור 23.





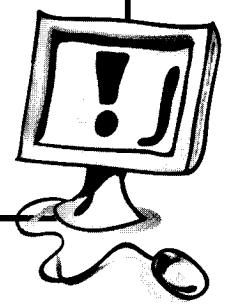
איור 23: כיוון הכוח המגנטי על מטען **חיובי** ועל **תייל נושא זרם** בשדה מגנטי-יישום כלל יד שמאל

ראה הדגמה:

כיוון הכוח הפועל על זרם חשמלי בשדה מגנטי

http://www.physicslessons.com/phe/phe.htm

באתר בחר את ההדמיה: "Lorentz Force"



נציין שהביטוי האחרון מתקיים בתנאי שהזרם זורם במאונך לעוצמת השדה המגנטי, כי רק כך מהירות הסחיפה ניצבת לעוצמת השדה המגנטי. קשר זה מאפשר לפרש מחדש את יחידת הטסלה:

$$1T = \frac{1N}{1A \cdot 1m}$$

עוצמת השדה המגנטי היא 1T, אם על כל מטר של תייל אשר דרכו זורם זרם של 1A בניצב לווקטור עוצמת השדה מופעל כוח מגנטי של 1N.

דוגמה 6:

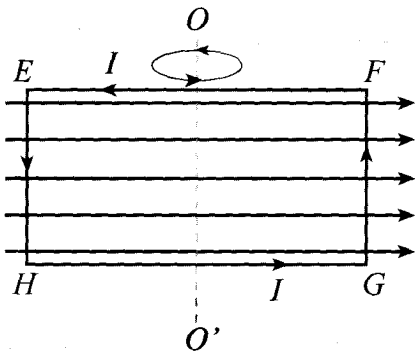
מסגרת מלבנית EFGH נתונה בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו $\vec{B}$ כמתואר באיור. במסגרת זורם זרם חשמלי שעוצמתו I נגד כיוון מחוגי השעון, כלומר כיוון הזרם בצלע EH הוא כלפי מטה.

נתון: אורך הצלע FG הוא a,

ואורך צלע EF הוא b.

א. בטא את הכוח המגנטי הפועל על כל אחת מצלעות המלבן.

ב. בטא את מומנט הכוח שפועל על המלבן EFGH סביב ציר OO'. ציר זה מקביל לצלעות FG ו- EH וחוצה את הצלעות GH ו- EF.



איור 24: מסגרת מלבנית EFGH נתונה בשדה מגנטי אחיד שכיוון עוצמתו ימינה. המסגרת נוטה להסתובב בכיוון החץ בהשפעת הכוחות המגנטיים הפועלים עליה.

<u>פתרון:</u>

א. על הצלעות EF ו- GH לא פועלים כוחות מגנטיים כי בצלעות אלה כיוון הזרם מקביל לשדה המגנטי.

גודלו של הכוח המגנטי על הצלע EH הוא F = BIa, וכיוונו מופנה אל הקורא, החוצה מהדף. הכוח המגנטי על הצלע FG, גודלו אף הוא F = BIa, וכיוונו מהקורא והלאה, לתוך הדף.

ב. מומנט הכוח מוגדר כמכפלת גודל הכוח F שפועל על גוף במרחק נקודת האחיזה של הכוח מציר הסיבוב, אם הכוח מכוון בניצב למישור המסגרת. מקובל לסמן את גודל מומנט הכוח באות היוונית τ ("טאו") שהכרנו בהקשר אחר. גודל המומנט על כל אחת מהצלעות EH ו-FG הוא:

$$\tau_1 = \tau_2 = BIa \cdot \frac{b}{2}$$

דוגמה 6 - המשך:

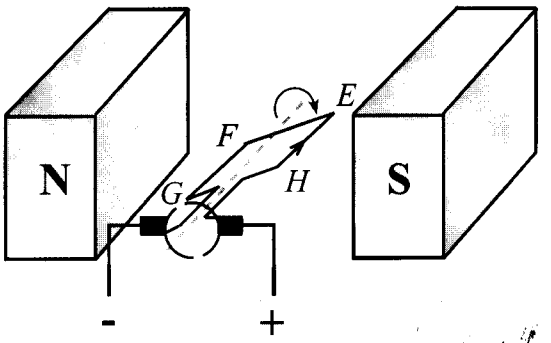
המומנטים מתחברים, כי שניהם נוטים לסובב את המסגרת באותה מגמה, לפיכך גודל המומנט הכולל שנוטה לסובב את המסגרת הוא:

$$\tau_1 + \tau_2 = 2 \cdot BIa\frac{b}{2} = BI(a \cdot b) = BIS$$

בביטוי האחרון "S" מציין את שטח המסגרת.

ניסקנות מפתרון דוגמה 6:

- המסגרת שבדוגמה נוטה להסתובב, והיא תתייצב (בסופו של דבר לאחר מספר תנודות סביב נקודת שיווי המשקל) בניצב לכיוון השדה המגנטי, כי במצב זה מומנט הסיבוב הוא אפס.
- גודל מומנט הכוח סביב הציר 'OO פרופורציוני לכל אחד מהגדלים בביטוי BIS.
- המסגרת המסתובבת בשדה מגנטי היא הבסיס להבנת עיקרון פעולתו של המנוע החשמלי.

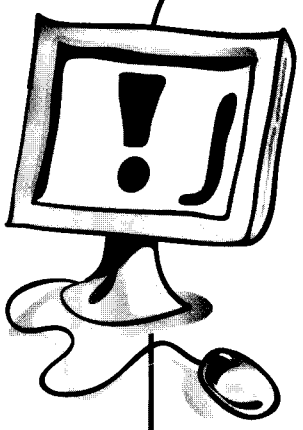


איור 28- ג חל שינוי במגמת כיוון הזרם בכריכה והיא כעת מ-H ל-E.

אחרי שהכריכה הסתובבה בזווית שהיא גדולה מ- 90°, כיוון הזרם בכריכה שינה מגמה, והוא עכשיו מ-H ל-E. ניתוח הכוחות המגנטיים הפועלים על קטעי המוליכים EH ו- FG מראה שצמד הכוחות ממשיך לסובב את הכריכה במגמת מחוגי השעון.

בפועל, סלילי המנועים עשויים מכריכות רבות. ריבוי הכריכות מבטיח שעם סגירת מעגל המנוע, תימצא תמיד כריכה שתתחיל להסתובב. להבהרת נקודה זו, דמיין שמנוע בעל כריכה בודדת מפסיק את סיבובו, כתוצאה מניתוק הזרם דרכו, כאשר הכריכה ניצבת לכיוון השדה המגנטי. האם מנוע זה יתחיל להסתובב ברגע שמחדשים את הזרם דרכו?

ובכן התשובה לשאלה זו היא שלילית, על כן במנוע אמיתי יש כריכות רבות, מסודרות במישורים מעט שונים סביב הציר.



ראה הדגמה:

עיקרון הפעולה של מנוע זרם ישר

http://www.physicslessons.com/phe/phe.htm

באתר מצא את הערך: "Direct Current Electrical Motor"

הנושא: כיצד פועל מנוע זרם ישר?

שים לב לפרטים הבאים:

1. כיוון השדה המגנטי
2. כיוון הכוח המגנטי הפועל על כריכת המנוע. לשם כך רצוי לעבור ל- pause.
3. ניתן להפוך את כיוון הזרם במנוע; המנוע מסתובב בכיוון הפוך.

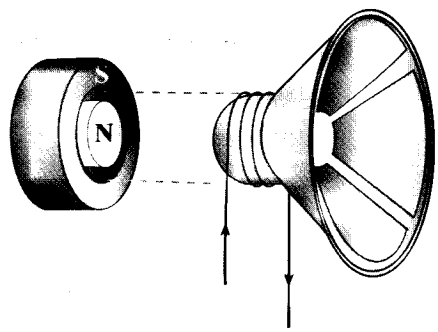
7.11 עיקרון הפעולה של רמקול

רמקול מורכב מחרוט גמיש עליו מחובר סליל הנמצא בשדה מגנטי שנוצר על ידי מגנט קבוע. מגנט זה הוא חלק ממבנה הרמקול (ראה איור 29). בסליל זורם זרם שמקורו במגבר שבמערכת הקולית, (טלוויזיה, CD, מחשב או כל מכשיר אחר), על כן הסליל יחד עם החרוט, ינועו קדימה, ואחורה – בהתאם לכיוון הזרם בסליל, הרמקול ירטיט את האוויר ויפיק צלילים. איכות הצלילים המופקים תלויה בין היתר במבנה הרמקול ובחומרים המרכיבים את החרוט. גובה הצלילים המופקים ברמקול תלוי בתדירות התנודות של החרוט, על כן יש קושי להפיק צלילים גבוהים ברמקולים גדולים מאוד. זוהי הסיבה לכך שבמערכת קולית איכותית קיימים מספר רמקולים בדרך כלל בגדלים שונים. יש כמובן סיבות נוספות, לעתים המוזיקה משודרת לרמקולים שונים כדי ליצור תחושה שהיא משודרת ממקומות שונים בו זמנית.

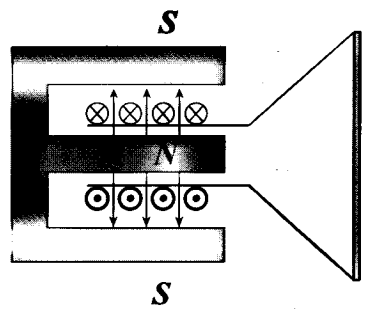
במערכות הגברה המשדרות מוזיקה בפארקים או באולמות גדולים יש חשיבות לעוצמת הקולות המשודרים. כדי שעוצמת הקול תהיה גדולה, על החרוט להיות בעל שטח גדול ואמפליטודת התנועות של החלק הגמיש צריכה להיות גדולה.

לעתים הצרכים אחרים, ויש צורך ברמקול אישי קטן מימדים, כמו באוזניות האישיות.

אוזניות הן למעשה רמקולים קטנים, מושתתים על עיקרון הפעולה שתואר כאן. את תפקיד החרוט ממלאת בדרך כלל דיסקית מתכת גמישה קטנת ממדים – המתאימה לגודל האזנייה.

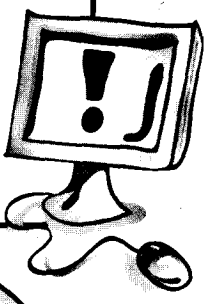


איור 29: עיקרון הפעולה של רמקול



איור30: באיור ניתן לראות את כיוון השדה המגנטי של המגנט הקבוע.
הסליל המוצמד לחרוט ינוע שמאלה וימינה, על פי כיוון הזרם בסליל.

ראה הדגמה:



"כיצד פועל רמקול"

http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/index.html

הנושא: "How A Speaker Works"

סיכום:

- לכל מגנט שני קטבים, צפון ודרום, ולא ניתן להפריד ביניהם.
- קיימים שני סוגי מגנטים: קבועים ואלקטרומגנטים. האחרונים מתפקדים כמגנטים כל עוד זורם בהם זרם. יתרונם הגדול בכך שניתן לשלוט על עוצמת השדה המגנטי שהם יוצרים.
- קווי שדה מגנטי תמיד סגורים.
- כיוונם של קווי שדה מגנטי הוא בכיוון אליו מצביע קוטב צפוני של מצפן בוחן החופשי להסתובב.
- הכוח הפועל על מטען חשמלי בשדה מגנטי ניתן על ידי הביטוי:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

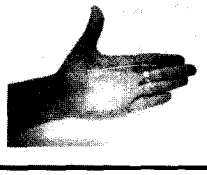
- כלל יד שמאל:

א. הנח את ידך באופן שהמטען החיובי יוצא מאצבעות יד שמאל.

ב. סובב את היד עד שקווי עוצמת השדה חודרים לכף היד.

ג. כיוון הכוח המגנטי שפועל על מטען חיובי- בכיוון האגודל הפרוש.

ד. לגבי מטען שלילי - הכוח מכוון הפוך למגמת הכוח שפועל על מטען חיובי.



- יחידת השדה המגנטי היא Tesla.

- הכוח המגנטי הפועל על תייל באורך L דרכו זורם זרם שעוצמתו I אשר נמצא בשדה מגנטי שעוצמתו B ניתן על ידי הביטוי:

$$F = BIL \cdot \sin\alpha$$

- על תייל שאורכו 1m הנמצא בשדה מגנטי שעוצמתו 1T פועל כוח בגודל 1N, אם דרך התייל זורם זרם של 1A. ניתן לראות במשפט זה הגדרה ליחידת השדה המגנטי, 1T.

- מסלול תנועתו של מטען הנע בשדה מגנטי הוא מעגלי או בורגי (helix).

- רדיוס המעגל המתאר את מסלול תנועתו של המטען ניתן על ידי :

$$R = \frac{mv}{Bq}$$

- זמן מחזור תנועת מטען בשדה מגנטי אחיד מחושב על פי:

$$T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

- "פסיעת הבורג" לתנועת מטען הנע בשדה מגנטי אחיד:

$$p = v_x T = v_x \frac{2\pi m}{Bq} = \frac{2\pi m v_x}{Bq} = \frac{2\pi m v \cos\alpha}{Bq}$$

במשוואה זו α מציין את הזווית בין וקטור השדה המגנטי לווקטור מהירות המטען.

- כריכה דרכה זורם זרם נוטה להתייצב בניצב לכיוון עוצמת השדה המגנטי.

- מומנט הסיבוב הפועל על סליל דרכו זורם זרם I, בעל N כריכות ששטח כל אחת מהן היא S, הנמצא בשדה מגנטי, ניתן על ידי הביטוי:

$$\tau_B = NBIS$$

תרגילים פרק 7

תנועת חלקיק בשדה מגנטי

נתונים:

- מסת פרוטון: $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$
- מסת אלקטרון: $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} kg$
- מסת חלקיק α: $m_\alpha = 6.68 \cdot 10^{-27} kg$

1. לאיזה כיוון יפנה מצפן, יחסית לציר +x, במקום בו נפגשים השדות המגנטיים B_1 ו- B_2 הבאים:

א. $B_X = 0.5T$
$B_Y = 0.3T$

ב. $B_X = -0.5T$
$B_Y = 0.3T$

ג. $B_1 = (0.5T, -0.3T)$
$B_2 = (0.2T, 1T)$

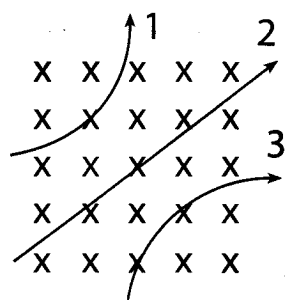
2. אלקטרון נע ללא הסחה בכיוון אופקי בתוך שדה מגנטי.
מה ניתן להסיק מעובדה זו על כיוונו של השדה המגנטי?

3. חלקיק טעון נע בקו ישר במהירות קבועה.

א. האם יתכן שהחלקיק נע בשדה מגנטי אחיד?

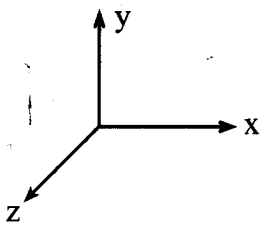
ב. האם יתכן שהוא נע בשדה חשמלי אחיד? הסבר תשובתך.

4. חלקיקים 1,2,3, נעים בשדה מגנטי אחיד. קבע את סימן מטענם של החלקיקים הנעים. הסבר קביעתך.



5. בטבלה מתוארים כיוון מהירותו v של פרוטון וכיוון הכוח F המגנטי הפועל עליו.
מהו כיוונו של ווקטור השדה המגנטי בכל מקרה?

	כיוון v	כיוון F
א.	+x	+y
ב.	+z	+y
ג.	-y	+x
ד.	-x	-y



6. "קרניים קוסמיות" הן למעשה אוסף חלקיקים טעונים שמקורם בחלל החיצון. מתצפיות מתברר שחלקיקים אלה בהתקרבם לכדור הארץ, באזור קו המשווה, נעים ממערב למזרח.

א. מהו סימן המטען של חלקיקים אלה? (הדרכה: הנח שווקטור עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ מכוון צפונה).

7. בסמוך לקו המשווה עוצמת השדה המגנטי היא $50\mu T$ בערך, וכיוון ווקטור השדה לצפון. בסמוך לארץ, עוצמת השדה החשמלי במזג אוויר נאה, היא כ- 100N/C בכיוון מטה. פרוטון נע מזרחה לאורך קו המשווה במהירות $v = 5 \cdot 10^6 m/s$. מצא את:

א. כוח הכובד הפועל על הפרוטון.

ב. הכוח החשמלי.

ג. הכוח המגנטי על פרוטון.

ד. מהי המסקנה המתבקשת מהערכים שהתקבלו בתשובות לסעיפים הקודמים?

8. איזה מהמשפטים הבאים נכון? נמק בחירתך.

א. "האנרגיה הקינטית של חלקיק טעון הנע בהשפעת שדה מגנטי בלבד, לעתים

קטנה, לעתים גדלה, לעתים אינה משתנה".

ב. "האנרגיה הקינטית של חלקיק הנע בהשפעת שדה מגנטי בלבד אינה משתנה".

ג. "חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי בלבד אינו יכול לנוע בקו ישר".

ד. חלקיק טעון הנע בקו ישר בהשפעת שדה מגנטי בלבד, ובמהלך תנועתו חוצה את קווי השדה אינו יכול לנוע בקו ישר".

9. לרוב, כאשר אלקטרון נע **בשדה חשמלי** אחיד בלבד, תנועתו פרבולית, ואילו כשהוא נע **בשדה מגנטי אחיד** תנועתו מעגלית. באיזה מצב שילוב שני השדות מאפשרים לאלקטרון לנוע בקו ישר? שרטט את ווקטורי השדות ואת ווקטור מהירות האלקטרון.

10. פרוטון שמהירותו v נכנס **במאונך** לתחום בו קיים **שדה מגנטי אחיד**. סמן בעמודה השמאלית בטבלה הבאה את הטענות הנכונות:

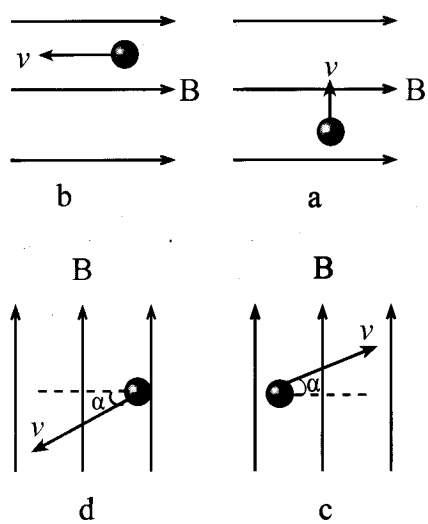
כיוון ווקטור המהירות	משתנה/ אינו משתנה
גודל ווקטור המהירות	משתנה/אינו משתנה
האנרגיה הקינטית	משתנה/אינו משתנה
מסלול הפרוטון	ישר/פרבולה/מעגל/ עקום אחר
כיוון התאוצה	משתנה/ אינו משתנה
גודל ווקטור תנע הפרוטון	משתנה/ אינו משתנה
כיוון ווקטור תנע הפרוטון	משתנה/ אינו משתנה

11. פרוטון שמהירותו v נכנס **במאונך** לתחום בו קיים **שדה חשמלי אחיד**. סמן בעמודה השמאלית בטבלה הבאה את הטענות הנכונות. הנכונות:

כיוון ווקטור המהירות	משתנה/ אינו משתנה
גודל ווקטור המהירות	משתנה/אינו משתנה

האנרגיה הקינטית	משתנה/אינה משתנה
מסלול הפרוטון	ישר/פרבולה/מעגל /עקום אחר
כיוון התאוצה	משתנה/אינו משתנה
גודל ווקטור תנע הפרוטון	משתנה/אינו משתנה
כיוון ווקטור תנע הפרוטון	משתנה/אינו משתנה

12. חלקיק שמטענו $3nC$ ומהירותו $5\cdot10^6 m/s$ נע במקום בו קיים שדה מגנטי שעוצמתו $0.4T$. באיורים הבאים $\alpha = 30°$.
ציין לכל מקרה את כיוונו ואת גודלו של הכוח המגנטי הפועל על החלקיק.



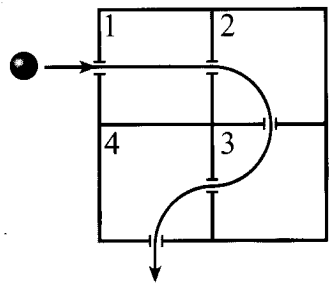
13.

א. האם קווי שדה חשמלי המייצגים את השדה השקול במקום מסוים יכולים לחתוך זה את זה? נמק תשובתך.

ב. האם קווי שדה מגנטיים המייצגים את השדה השקול במקום מסוים יכולים לחתוך זה את זה? נמק תשובתך.

14. באיור מתואר מבט על של תנועת פרוטון במבוך. בחלק מחדרי המבוך שורר שדה מגנטי אחיד מכוון בניצב

למישור הדף, ובחלקם אין כלל שדה מגנטי.

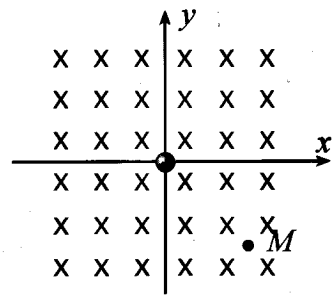


א. מהו כיוון השדה המגנטי בכל חדר?

ב. מהירות הפרוטון בחדר 2 היא v. האם מהירותו בצאתו מהמבוך קטנה מ-v, גדולה מ-v, או שווה ל- v? נמק תשובתך.

ג. איזה מהמשפטים הבאים נכון:
1. "לא ייתכן שבחדר 1 קיים שדה חשמלי אחיד".
2. " שדה חשמלי אחיד בחדר 1 בהכרח יגרום לפרוטון לסטות ממסלולו הישר".
3. "ייתכן שבחדר 1 קיים שדה חשמלי שכיוונו בכיוון תנועת הפרוטון".

*15. פרוטון מונח בראשית הצירים בשדה מגנטי אחיד המכוון לתוך הדף. המטרה M נמצאת ברביע הרביעי. ניתן לשגר את הפרוטון במהירות התחלתית v מתאימה בכיוון הצירים +x, -x, +y, או -y בלבד. הפרוטון יפגע במטרה M רק בשתיים מתוך ארבע אפשרויות השיגור.

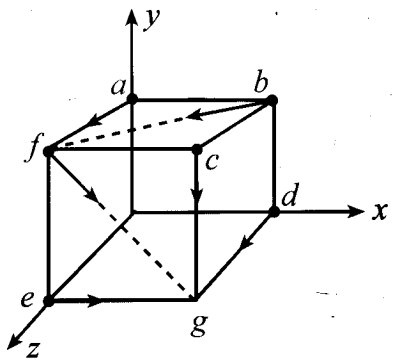


א. מהם הכיוונים המאפשרים פגיעה במטרה? הסבר תשובתך.

ב. צייר את המסלולים של הפרוטון כאשר הוא משוגר אל המטרה בתנאי השאלה.

16. באטום המימן אלקטרון נע בתנועה מעגלית סביב פרוטון ברדיוס $r = 0.53\cdot10^{-10}m$, $v = 2.2\cdot10^{6}m/s$. אטום מימן מוכנס לשדה מגנטי שכיוונו ניצב למישור מסלול האלקטרון, ועוצמתו 0.1T. חשב את היחס בין הכוח האלקטרוסטאטי הפועל בין האלקטרון לפרוטון, לבין הכוח המגנטי המכסימלי שפועל על האלקטרון.

17. הנקודות הכחולות בקודקוד הקובייה מסמנות מטענים חיוביים q, הנעים במהירות v, בכיוון החיצים. באזור קיים שדה מגנטי אחיד בעוצמה B בכיוון +y. בטא את גודל הכוח הפועל על כל אחד מהמטענים, וציין בכל מקרה את כיוונו.



18. לחלקיק שמטענו 25nC, ומסתו 0.5g מוענקת מהירות אופקית $6\cdot10^{4}m/s$ בכיוון הצפון. מהי עוצמת השדה המגנטי, ומה כיוונה, אם החלקיק נע צפונה בקו ישר המקביל לפני הקרקע? בשאלה זו התעלם מהשפעת השדה המגנטי של כדור הארץ.

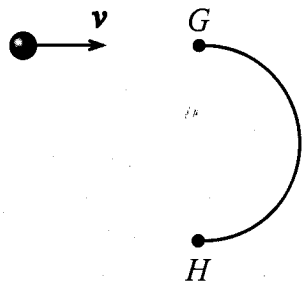
19. חלקיק שמטענו $7.2\cdot10^{-6}C$, ומסתו $6\cdot10^{-8}kg$ נע מערבה בניצב לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 3T. החלקיק משלים חצי סיבוב, ועוזב את השדה תוך כדי התקדמות מזרחה. תוך כמה זמן ישלים החלקיק את מחצית הסיבוב?

20. פרוטון נקלע לשדה מגנטי אחיד במהירות $10^{7}m/s$ בנקודה G. מצא את:

א. הגודל ואת הכיוון של השדה המגנטי שגורם לפרוטון לנוע על פני קשת חצי

מעגלית מ- G ל- H. ידוע שאורך הקוטר GH הוא 12cm.

ב. חשב את זמן תנועת הפרוטון בין שתי הנקודות G ו – H.



*21. חלקיק α ($m_\alpha = 6.68\cdot10^{-27}\,kg$) ואלקטרון נעים במסלולים מעגליים באותו שדה מגנטי אחיד. מהו היחס בין תדירות סיבוב האלקטרון לבין תדירות חלקיק ה - α ?

22. יון ליתיום חיובי שמטענו e+ הואץ בהפרש פוטנציאלים 100V ואחר כך נכנס במאונך לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.5T. מסת יון הליתיום $1.18\cdot10^{-26}kg$. חשב את:
א. רדיוס מסלול היון בשדה המגנטי.
ב. זמן מחזור סיבובו.

23. לפרוטון אנרגיה קינטית $4\cdot10^{-12}J$ כאשר הוא נכנס "לתא ערפל"* בניצב לשדה המגנטי שעוצמתו 0.25T. מהו רדיוס העקמומיות של מסלול הפרוטון?
* (בתא ערפל חלקיקים טעונים משאירים עקבות שמתוכם ניתן למדוד את רדיוס מסלולם. עובדה זו מנוצלת לחקירת סימן המטען והיחס q/m (גודל זה מכונה מטען סגולי) של החלקיק הנע בתא הערפל, לפי העיקרון שמדד תומסון את הערך e/m לאלקטרון).

24. אלומת אלקטרונים נעה ללא סטייה במקום בו נחתכים בזווית ישרה שדה מגנטי ושדה חשמלי אחידים בעלי עוצמות 3mT ו-$5\cdot10^4$ V/m בהתאמה.
א. מהי מהירותו של אלקטרון באלומה?
ב. שרטט את הווקטורים $\vec{E},\vec{B},\vec{v}$ בכיוונים מתאימים.
ג. מה יהיה רדיוס סיבוב האלקטרון אם נסלק את השדה החשמלי?

25. פרוטון נע במהירות $4\cdot10^6$m/s בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 1.7T. מתברר שהכוח הפועל על הפרוטון הוא $8.2\cdot10^{-13}$N. מצא את הזווית בין כיוון עוצמת השדה המגנטי לבין כיוון מהירות הפרוטון.

26. אלקטרון נכנס בניצב לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 1.5T. האלקטרון יוצא מהשדה לאחר שהוסח מכיוונו המקורי בזווית של 38°. כמה זמן שהה האלקטרון בתוך השדה?

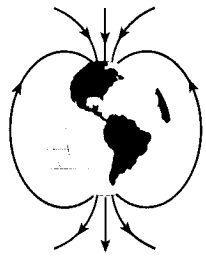
תנועה בורגית

27. הסבר במילים את התנאי לכך שמטען ינוע בשדה מגנטי אחיד:
א. במסלול מעגלי.
ב. במסלול בורגי.
*ג. בתא ערפל (ראה שאלה 23) מסלול חלקיק טעון הוא עקום בעל רדיוס עקמומיות הולך וקטן. כיצד ניתן להסביר היווצרות מסלול זה?
**ד. באיזה תנאי ייווצר מסלול בורגי בעל רדיוס עקמומיות הולך וקטן, ובעל פסיעה הולכת וקטנה?

28. פרוטון נכנס לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 2T במהירות $2\cdot10^7$m/s, בזווית 30° יחסית לקווי השדה. חשב את:
א. רדיוס סיבוב הפרוטון.
ב. זמן מחזור סיבוב הפרוטון.
ג. פסיעת הבורג של מסלול הפרוטון.

29. אלקטרון מהשמש שמהירותו 10^8m/s נכנס לשדה המגנטי של כדור הארץ סמוך לקו המשווה. במקום זה עוצמת השדה המגנטי היא $4\cdot10^{-7}$T .

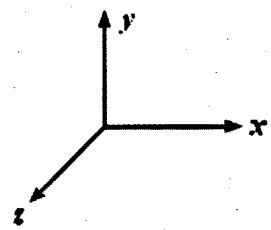
[האלקטרון נע בתנועה מעגלית, למעט סחיפה קטנה בכיוון השדה המגנטי של הארץ, המסיעה את האלקטרון גבוה מעל הקוטב הצפוני. זוהר הקוטב[1] קשור, בין היתר, במנגנון הסעה זה של חלקיקים טעונים אל הקוטב].



א. מהו רדיוס תנועת האלקטרון באזור קו המשווה?

ב. מהו רדיוס האלקטרון בקוטב הצפוני אם עוצמת השדה המגנטי באזור זה היא $2\cdot10^{-5}T$?

*30. גוף שמטענו 2nC נע בשדה מגנטי שכיוונו z+ ועוצמתו 0.3T. ידוע שברגע מסוים רכיבי מהירות היו:
$v_y = 7\cdot10^{4}m/s$, $v_x = 2.5\cdot10^{4}m/s$
ו- $v_z = -7\cdot10^{4}m/s$.
חשב את:



א. רכיבי הכוח שפעלו על הגוף ברגע הנתון.

ב. הכוח השקול שפעל על הגוף.

ג. הסבר מדוע מסלול הגוף בורגי.

ד. מסת הגוף $8\cdot10^{-16}Kg$. מהו רדיוס העקמומיות של מסלול הגוף?

ה. חשב את פסיעת בורג המסלול.

31. פרוטונים בעלי אנרגיה קינטית 3KeV נכנסים לשדה מגנטי אחיד שכיוונו x+ ועוצמתו 0.4T, בזווית $60°$ עם כיוון השדה.

א. חשב את "מהירות הסחיפה" של הפרוטונים לאורך ציר x.

ב. מדוע מוצדק לכנות מהירות זו בשם "מהירות סחיפה"?

ג. חשב את רדיוס המעגל.

ד. חשב את זמן המחזור של מעגל יחיד.

ה. חשב את פסיעת הבורג שלהפרוטונים.

ספקטרוגרף מסות וציקלוטרון

32. בורר מהירויות מורכב משדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.3T ושדה חשמלי אחיד שעוצמתו $4.8\cdot10^{5}V/m$. השדות מאונכים זה לזה.

א. חשב את מהירותו של חלקיק טעון העובר דרך הבורר ללא הסחה.

בטא ביחידות eV את האנרגיה של:

ב. פרוטונים שחולפים בבורר ללא הסחה.

ג. אלקטרונים שחולפים בבורר ללא הסחה.

33. אלומת פרוטונים נעה ללא הסחה במהירות $1.24\cdot10^{4}m/s$ לכיוון x+, במקום שבו שדה חשמלי ושדה מגנטי מאונכים זה לזה. השדה המגנטי פונה בכיוון y– ועוצמתו 0.85T.

א. הראה בציור מתאים את ווקטורי השדות ומהירות הפרוטון.

ב. מצא את עוצמתו ואת כיוונו של השדה החשמלי.

ג. האם אלקטרונים שנעים באותה מהירות ובאותו כיוון יוסחו מכיוונם המקורי במקום זה? אם כן, באיזה כיוון? אם לא נמק.

34. ליון מגנזיום $^{24}Mg^{+1}$ (24 הוא סכום מספר הפרוטונים והניטרונים, ומטען היון e+) מסה $3.983\cdot10^{-26}kg$. היון מואץ באמצעות מתח 2.5KV, והוא נכנס בניצב לשדה מגנטי שעוצמתו 55.7mT.

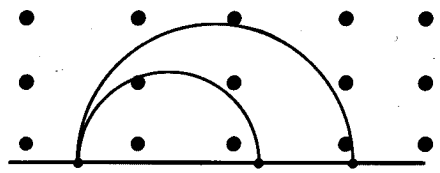
א. חשב את רדיוס מסלולו בשדה המגנטי.

*ב. חשב את רדיוס מסלולו של יון $^{26}Mg^{+1}$ בשדה זה. גם יון זה הואץ במתח המוזכר בשאלה. הנח שיחס מסות היונים הוא 26/24.

[1] עיין ערך Aurora Borealis

35. מסות האיזוטופים $^{12}_{6}C$ ו-$^{13}_{6}C$ הן $19.93\cdot10^{-27}kg$ ו- $21.59\cdot10^{-27}kg$ בהתאמה. כל אחד מהאיזוטופים הללו מיונן כך שמטענו $+e$. האיזוטופים נכנסים במהירות $6.67\cdot10^{5}m/s$ לשדה מגנטי אחיד של ספקטרומטר מסות שעוצמתו $0.85T$.

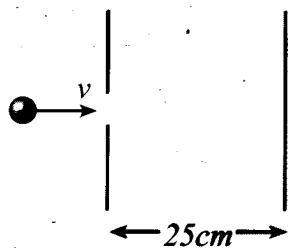
א. חשב את המרחק בין שני היונים אחרי שהשלימו חצי סיבוב בשדה המגנטי.



ב. מהי עוצמת השדה החשמלי בבורר המהירויות, אם עוצמת השדה המגנטי בבורר זהה לעוצמת השדה הנתונה בשאלה?

36. חלקיק טעון נע בקו ישר בבורר מהירויות בו בעוצמות השדות הניצבים הן: $3.8KV/m$ ו-$0.36T$. כאשר מבטלים את השדה החשמלי החלקיק נע במעגל ברדיוס $4.3cm$. חשב את המטען הסגולי של החלקיק - q/m.

37. פרוטון שמהירותו $3.5\cdot10^{6}m/s$ נכנס לאזור תחום על ידי שני לוחות מקבילים שביניהם קיים שדה מגנטי אחיד בניצב לדף. מהירות הפרוטון ניצבת לשדה המגנטי, והמרחק בין הלוחות הוא $25cm$. חשב את עוצמתו של השדה המגנטי המאפשר לפרוטון לחלוף סמוך מאוד ללוח הנגדי מבלי להתנגש בו.



38. לציקלוטרון שדה מגנטי שעוצמתו $1.8T$, והוא מיועד להאיץ פרוטונים לאנרגיה של $25MeV$.

א. חשב את מהירות הפרוטונים שהואצו בציקלוטרון.

ב. מהו הרדיוס המזערי של המכשיר המאפשר השגת אנרגיה זו? (הדרכה: רדיוס זה מתאים למהירות הסופית של הפרוטונים המואצים).

ג. מהי תדירות תנועת המטען?

ד. המתח המתחלף בין חלקי הציקלוטרון הוא $50KV$. כמה סיבובים משלימים הפרוטונים עד שמגיעים לאנרגיה זו?

39. רדיוס ציקלוטרון המאיץ פרוטונים הוא $70cm$, ועוצמת השדה המגנטי $1.4T$.

א. מהי תדירות תנועת המטען?

ב. מהי אנרגית הפרוטונים שעוזבים את המכשיר? בטא תשובתך ביחידות SI וביחידות-eV.

ג. כיצד משתנות תשובותיך אם הפרוטונים יוחלפו בדויטריום ($^{2}_{1}H^{+}$). הנח שיחס מסות היונים המוזכרים הוא 1:2, ומטענם זהה, $+e$.

40. מתח ההאצה בין חלקי ציקלוטרון הוא $16kV$. במכשיר מואצים חלקיקי α. (שים לב, מטענם $+2e$).

א. בכמה משתנה האנרגיה הקינטית של החלקיקים אחרי 10 סיבובים?

ב. לחלקיקי ה-α מהירויות שונות ורדיוסים שונים במהלך האצתם. איך בכל זאת אפשר לסנכרן את תדירות חילוף מתח ההאצה לכל הרדיוסים? נמק תשובתך.

41. בציקלוטרון מואצים חלקיקי α במתח $100kV$. עוצמת השדה המגנטי $1.67T$, וחלקיקי ה-α עוזבים את הציקלוטרון אחרי שמשלימים 200 סיבובים.

א. חשב את הזמן שחלקיק α שוהה בציקלוטרון.

ב. מהו רדיוס המסלול החיצוני במכשיר?

ג. *בכמה משתנה ערך הרדיוס בין הסיבוב ה-100 לבין ערכו בסיבוב האחרון?

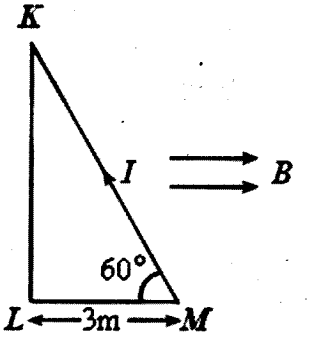
כוח מגנטי על זרם

42. חשב את הכוח הפועל על תייל באורך 40cm הנושא זרם של 2.5A בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.3T כאשר:
א. התייל מקביל לקווי השדה המגנטי.
ב. התייל מאונך לקווי השדה המגנטי.
ג. התייל יוצר זווית של 60° עם קווי השדה המגנטי.

43. תייל נושא זרם של 350A מתוח בכיוון אופקי בין שני עמודים. עוצמת השדה המגנטי הארצי במקום זה היא $5\cdot10^{-5}$T. בהנחה שהתייל ניצב לכיוון עוצמת השדה המגנטי, חשב את הכוח הפועל על קטע תייל שאורכו 140m.

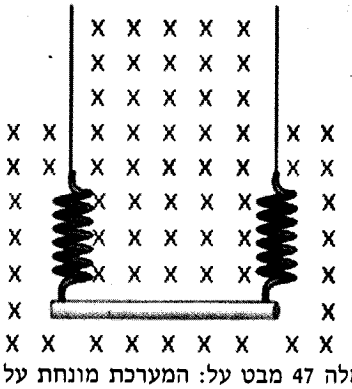
44. בתייל מתכתי עוצמת הזרם היא 0.8A התייל נמצא בתוך שדה מגנטי אחיד שעוצמתו היא $5\cdot10^{-5}$T. הזווית בין הזרם בתייל לבין קווי השדה היא 60°, ועל התייל פועל כוח $7.5\cdot10^{-5}$N. חשב את אורך התייל.

45. עוצמת הזרם בתייל שצורתו משולש ישר זווית 5A, B = 0.2T, ראה איור.
א. חשב את הכוח (גודל וכיוון) על כל אחת מצלעות המשולש.



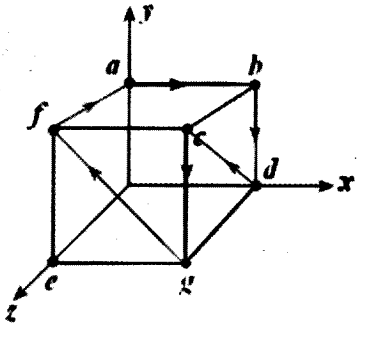
*46. שני תיילים מבודדים מבחינה חשמלית הוצמדו זה לזה, וכתוצאה מכך יוצרים יחידת הולכה דו כיוונית באורך 3m. בתייל אחד עוצמת הזרם היא 5A, ובאחר עוצמת הזרם גדולה יותר, וכיוונו מנוגד לזרם של התייל הראשון. כשהתילים הוכנסו בניצב לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.32T, פעל עליהם כוח מגנטי בגודל 4.8N. חשב:
א. את עוצמת הזרם בתייל השני.
ב. באיזה כיוון יש להטות את התיילים יחסית לכיוונם המקורי כדי שהכוח השקול עליהם יהיה 20% מהערך הנתון?

47. על שולחן אופקי חלק מונח מוט מוליך באורך 1.2m. המוט מחובר לשני קפיצים זהים. ראה באיור את המערכת ממבט על. שדה מגנטי אחיד בעוצמה 3.2T ניצב לשולחן. המוליכים מקובעים, ורק המוט עשוי להחליק על השולחן. כשמזרימים זרם שעוצמתו 0.8A במוט, הקפיצים מתארכים ב-3cm.
א. מהו כיוון הזרם במוט?
ב. חשב את קבוע הכוח k של הקפיצים.
ג. מהי עוצמת הזרם שעשויה לכווץ את הקפיצים ב-1.2cm?



לשאלה 47 מבט על: המערכת מונחת על שולחן אופקי

48. התיל abdcgfa נושא זרם שעוצמתו 5A. אורך מקצוע הקובייה 6cm. קבע את גודל הכוח המגנטי ואת כיוונו על כל אחד מקטעי התיל, אם התיל נתון בשדה מגנטי אחיד שכיוונו y+, ועוצמתו 1.6T.



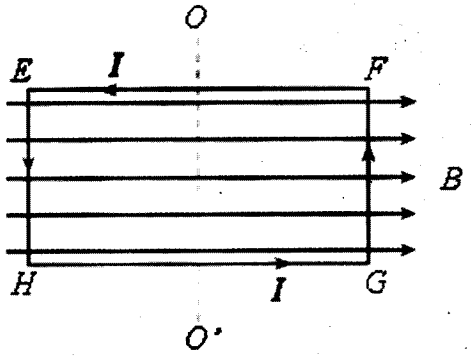
49. באיור שתי כריכות ריבועיות זהות הנושאות זרם I , נתונות בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו B. $EF = a$, $EH = b$.

א. איזו מהכריכות נוטה להסתובב סביב הציר OO', ובאיזה כיוון?

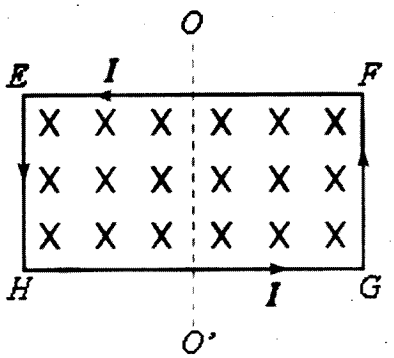
*ב. חשב את מומנט הסיבוב סביב הציר OO' של הכריכה הנוטה להסתובב.

*ג. מהם הגורמים המשפיעים על גודל מומנט הסיבוב של הכריכה המתוארת?

ד. טענה: "על הכריכה שאינה נוטה להסתובב, פועלים כוחות הנוטים לכווץ את הכריכה, כלומר להקטין את שטחה". האם הטענה נכונה? הסבר.



איור א'



איור ב'

50. אלומת חלקיקים טעונים בעלי מטען q ומסה m נכנסים לתחום שבין לוחות קבל NM. בתחום זה קיים שדה חשמלי E של הקבל, וגם שדה מגנטי אחיד B, ניצב לשדה החשמלי. חלק מהחלקיקים נעים במסלול ישר, ויוצאים מן הקבל דרך חריר בנקודה O. ראה איור בסוף השאלה.

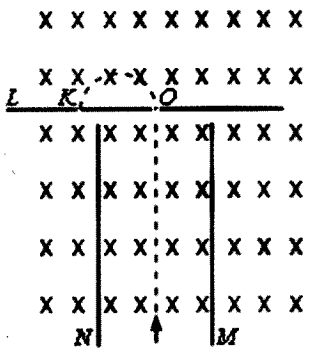
אחרי נקודה O הם נעים בהשפעת השדה המגנטי בלבד ופוגעים בנקודה K. הזנח את כוח הכובד הפועל על החלקיקים באלומה.

א. האם מטען החלקיקים באלומה חיובי או שלילי? נמק תשובתך.

ב. מהו התנאי שהחלקיקים ינועו בקו ישר בתחום הקבל המתואר?

ג. בטא את המרחק KO שבאיור באמצעות q,m,E ו-B.

ד. ניתן לשנות את הגדלים E ו-B בלבד. כיצד יש לשנות גדלים אלה כדי להגדיל את המרחק KO ? (שים לב, לא ניתן לשנות את מהירות החלקיקים!)



איור לתרגיל 50

51. ניתוח תוצאות ניסוי:
באיור מתוארים מאזניי זרם. מסגרת מוליכה נתמכת בשתי נקודות OO' כך שהיא מאוזנת כאשר אין בה זרם. כאשר זורם בה זרם, המסגרת נוטה נגד מגמת מחוגי השעון. הטיה זו היא תוצאה של הכוח המגנטי המופעל על קטע המוליך באורך $t = 3cm$ הנמצא בשדה המגנטי שנוצר על ידי פרסה מגנטית. ניתן לאזן את המסגרת באמצעות משקולות שמוסיפים על הצלע GD של המסגרת. בטבלה הבאה רוכזו תוצאות המדידה בניסוי בו הוזרמו במסגרת זרמים בעוצמות שונות, והמסגרת אוזנה על ידי סיכות משרד זהות, במסה $m = 0.025g$ כל אחת.
התעלם מהשפעת השדה המגנטי של כדור הארץ.

תוצאות הניסוי:

מספר הסיכות	I(A)
1	0.6
2	1.25
3	1.9
4	2.5
5	3.1
6	3.8

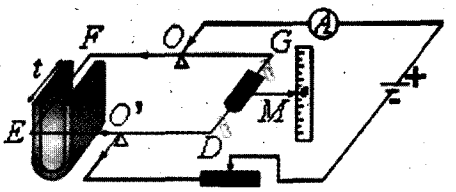
א. מהו כיוון השדה המגנטי בפרסה?

ב. שרטט בקנה מידה מתאים גרף של הכוח המגנטי על קטע המסגרת כתלות בעוצמת הזרם במסגרת.

בחר יחידות ניוטון ואמפר.

ג. חשב את שיפוע הגרף, וציין את יחידותיו.

ד. חשב מתוך שיפוע הגרף את עוצמת השדה המגנטי של הפרסה.



מאזניי זרם לתרגיל 51

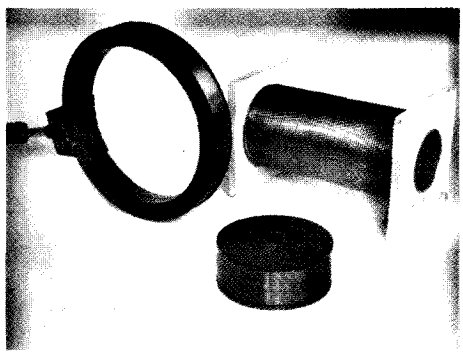
פתרון תרגילים פרק

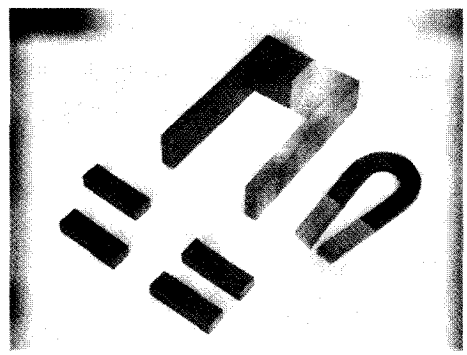
1. א. 30.96°
   ב. 149°
   ג. 45°
5. א. $-z$
   ב. $+x$
   ג. $-z$
   ד. $-z$
12. א. $6\cdot10^{-3}N$ לתוך הדף
   ב. 0
   ג. $5.2\cdot10^{-3}N$ החוצה מהדף
   ד. $5.2\cdot10^{-3}N$ לתוך הדף
16. א. $2.33\cdot10^{6}$
17. א. $F_a = Bqv$ בכיוון $-x$
   ב. $F_b = Bqv$ מ- c ל- a
   ג. $F_c = 0$
18. 3.33T
19. $8.73\cdot10^{-3}s$
20. א. 1.74T החוצה מהדף
   ב. $1.88\cdot10^{-8}s$
21. 3666.3
22. א. $7.68\cdot10^{-3}m$
   ב. $9.27\cdot10^{-7}s$
23. 2.89m
24. א. $1.67\cdot10^{7}m/s$
   ג. 3.17m
25. 48.9°
26. $2.5\cdot10^{-12}s$
28. א. 5.22cm
   ב. $3.28\cdot10^{-8}s$
   ג. 0.568m
29. א. 1.42Km
   ב. 28.47m
30. א. $F_x = 4.2\cdot10^{-5}N$
   $F_y = -1.5\cdot10^{-5}N$
   $F_z = 0$
   ב. $4.45\cdot10^{-5}N$
   19.65° מתחת לציר x
   ד. 9.9cm
   ה. 58.6cm
31. א. $3.79\cdot10^{5}m/s$
   ג. $8.6\cdot10^{-3}m$
   ד. $1.63\cdot10^{-7}s$
   ה. 6.17cm
32. א. $1.6\cdot10^{6}m/s$
   ב. $1.34\cdot10^{4}eV$
   ג. 7.29eV
33. ב. $1.05\cdot10^{4}V/m$
   ג. לא
34. א. 63cm
   ב. 66cm
35. א. 1.63cm
   ב. $5.67\cdot10^{5}V/m$
36. $6.82\cdot10^{5}C/kg$
37. 0.146T
38. א. $6.92\cdot10^{7}m/s$
   ב. 40cm
   ג. $2.75\cdot10^{7}Hz$
   ד. 250
39. א. 21.35MHz
   ב. $7.36\cdot10^{-12}J$
   או 46MeV
   ג. f קטן פי 2
   E_k קטן פי 2
40. $1.024\cdot10^{-13}J$
   או 0.64MeV
41. א. $1.57\cdot10^{-5}s$
   ב. 0.77m
   ג. 0.227m
42. א. 0
   ב. 0.3N
   ג. 0.26N
43. 2.45N
44. 2.17m
45. $F_{LM} = 0$
   $F_{KL} = 5.2N$ החוצה מהדף
   $F_{KM} = 5.2N$ לתוך הדף
46. א. 10A
   ב. 11.54°
47. ב. 51.2N/m
   ג. 0.32A
48. א. $F_{cg} = F_{bd} = 0$
   ב. $F_{ab} = 0.48N$ בכיוון $+z$
   ג. $F_{fa} = 0.48N$ בכיוון $+x$
49. א. כריכה א', EG לתוך הדף
   ב. Bab
50. א. חיובי
   ב. $\frac{2mE}{B^2q}$

פרק 8 - מקורות שדה מגנטי

מבוא

בפרק הקודם עסקנו בכוחות מגנטיים הפועלים על מטענים נעים ועל זרמים חשמליים.
עד כה התייחסנו לשדה המגנטי כאל עובדה מוגמרת, אך לא שאלנו את עצמנו כיצד הוא נוצר. לא שאלנו האם יש בידינו לקבוע את עוצמתו או את תכונותיו הגיאומטריות; האם אפשר ליצור שדה אחיד או בעל סימטריה כלשהי?
בפרק הנוכחי נתאר את המקורות של השדה המגנטי. בתחילה נציג את העבודה הניסיונית שביצעו צמד החוקרים ביו (Biot) וסבר (Savart), ובהמשך נראה את ההכללה של עבודתם הנושאת את השם "חוק ביו–סבר". חוק זה מאפשר לחשב את עוצמת השדה המגנטי הנוצר סביב מוליך שזורם בו זרם חשמלי. נדגים באמצעות חוק ביו-סבר את חישוב עוצמת השדה של מוליך אינסופי ושל כריכה מעגלית דרכם זורם זרם, תוך שימוש בעיקרון הסופרפוזיציה.
בנוסף, נדון בכוחות המגנטיים בין שני זרמים חשמליים מקבילים. חישוב כוחות אלה מאפשר להגדיר מחדש את יחידת האמפר לעוצמת זרם בשיטת היחידות SI.
נסיים את הפרק בחוק אמפר (Ampère) המאפשר אף הוא לחשב את עוצמת השדה המגנטי הנוצר על ידי זרמים. נדון ביצירת שדה מגנטי אחיד בתוך סליל ארוך, ונעזר בחוק אמפר לחישוב עוצמתו.
באיור למטה מוצגות שתי קבוצות מגנטים:
"מגנטים קבועים" (permanent magnets), ו-"אלקטרומגנטים". עוצמת השדה המגנטי של אלקטרומגנטים תלויה בעוצמת הזרם החשמלי דרכם, על כן אפשר לשלוט על עוצמת השדה המגנטי בקרבתם, לכך יש יתרון טכנולוגי חשוב. על ידי ניתוק הזרם ניתן לאפס את עוצמת השדה המגנטי, בעוד שבמגנטים הקבועים אי אפשר לשנות את עוצמת השדה המגנטי.

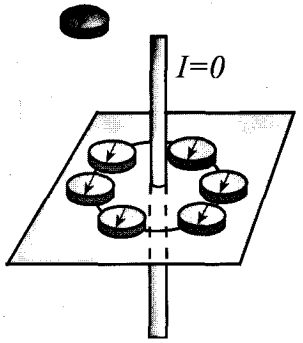




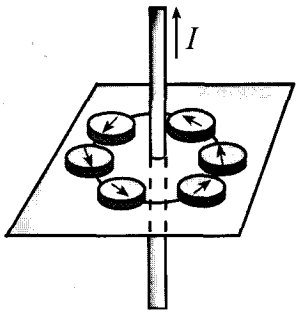
8.1 יצירת שדה מגנטי על ידי זרם חשמלי

בשנת 1819 מצא ארסטד (Öersted) שמצפן מושפע מזרם חשמלי. מניסוי זה ניתן להסיק את המסקנה שזרם חשמלי יוצר שדה מגנטי.

זוג המדענים מצרפת, ביו וסבר, חקרו, זמן קצר אחרי התגלית של ארסטד, את אופי השדה המגנטי של זרמים, ומצאו דרך תיאורטית לחישוב עוצמת השדה המגנטי $\vec{B}$. נתאר בקצרה את ממצאי מחקרם: קווי השדה המגנטי של מוליך ישר הם מעגלים סגורים[1] שמרכזם במוליך, ומישורם ניצב למוליך.



איור 1-א: בהעדר זרם, המצפנים מצביעים צפונה

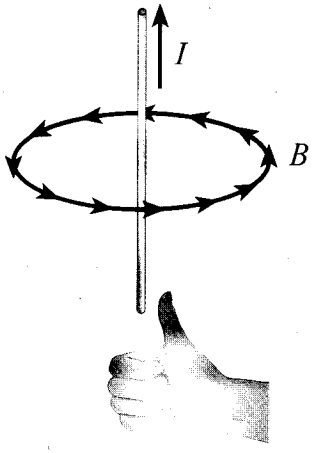


איור 1-ב: כשזורם זרם, המצפנים סוטים בהתאם לכיוון השדה המגנטי השקול הנוצר על ידי הזרם $\vec{B}_I$ ועל ידי השדה המגנטי של כדור הארץ, $\vec{B}_E$.

על פי כיוון המצפנים ניתן לראות שבמקרה המתואר באיור $\vec{B}_I >> \vec{B}_E$.

[1] העובדה שקווי השדה המגנטי סגורים היא עדות לכך שלא קיים חד קוטב מגנטי.

כיוון קווי השדה האלה הוא כיוון הסיבוב של בורג שמתקדם בכיוון הזרם, או לפי "כלל יד ימין":
כאשר אגודל יד ימין מכוון בכיוון הזרם, האצבעות המכופפות "משרטטות" את קווי השדה המגנטי (איור 2). אנו נאמץ שיטה זו לקביעת כיוון השדה המגנטי ונכנה אותה "כלל יד ימין".
האיור הבא מתאר את כיוון השדה המגנטי:



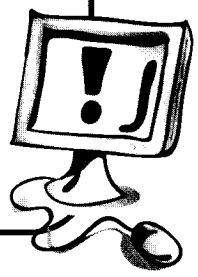
איור 2: תיאור כיוון קווי השדה המגנטי על ידי "כלל יד ימין"

ראה הדגמיה - השדה של תייל נושא זרם:

http://www.physicslessons.com/phe/phe.htm

Magnetic Field of a Straight Current-Carrying Wire

בהדמיה ניתן לראות את קווי השדה ואת ה"מצפן הבוחן".



גודל עוצמת השדה המגנטי B פרופורציוני לגודל הזרם I, ופרופורציוני הפוך למרחק r מהמוליך.
ערכה של עוצמת השדה המגנטי הנוצר על ידי תייל ישר אינסופי אשר דרכו זורם זרם ניתנת על ידי הביטוי:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

כאשר ערכו של הקבוע μ_0 הוא:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$$

דוגמה 1

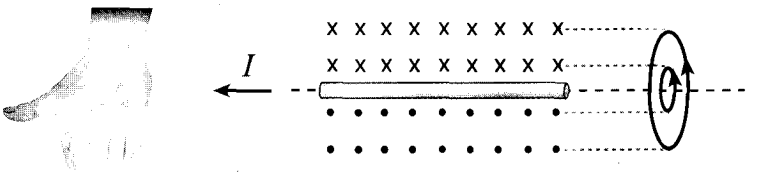
עוצמת הזרם במוליך ישר וארוך היא 25A.

א. תאר את כיוון השדה המגנטי מסביב למוליך, וחשב את עוצמת השדה המגנטי במרחק 1cm מהמוליך.

ב. השווה עוצמת שדה זו לעוצמת השדה של מוט מגנטי במעבדה. גודל עוצמת השדה של מוט מגנטי רגיל במעבדה במרחק 1cm ממנו עשוי להיות כ- 0.5 T.

פתרון:

א. לפי "כלל יד ימין", כיוון השדה המגנטי כמתואר באיור:



איור 3: כיוון עוצמת השדה המגנטי מתואר על ידי "כלל יד ימין"

במרחק 1cm מהמוליך, עוצמת השדה המגנטי היא:

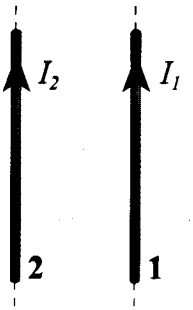
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 25}{2\pi \cdot 0.01} = 5 \cdot 10^{-4} T$$

ב. עוצמת השדה של המוליך אותה חישבנו בסעיף הקודם קטנה במידה ניכרת מעוצמת השדה המגנטי של המוט שהוזכר בשאלה[2]. בהמשך פרק זה, נדון בסלילים שעוצמת השדה המגנטי בהם גדולה הרבה יותר עקב ריבוי מספר הכריכות.

[2] עם זאת, זהו סדר הגודל של העוצמה המגנטית על פני כדור הארץ, לכן מצפן יושפע מהשדה המגנטי של מוליך זה.

8.2 הכוח המגנטי בין שני זרמים מקבילים

נחשב את הכוח המגנטי שמפעילים זה על זה שני מוליכים מקבילים ארוכים מאוד, המרוחקים זה מזה מרחק r, כאשר עוצמות הזרמים במוליכים הן I_1 ו- I_2 , כמתואר באיור:



איור 4: זרמים במוליכים מקבילים

בפרק הקודם הכרנו את הביטוי לכוח שפועל על מוליך באורך l, אשר דרכו זורם זרם I כאשר הוא נמצא בשדה מגנטי B:

$$F = BIl$$

אם השדה המגנטי נוצר על ידי זרם I_1 שזורם במוליך "אינסופי", גודל הכוח המגנטי על המוליך באורך l , דרכו זורם זרם I_2, הנמצא במרחק r מהמוליך הראשון הוא:

$$F = B_1 I_2 l = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} I_2 l$$

נחלק את הביטוי באורך המוליך l:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} I_2$$

זהו הביטוי לגודל הכוח המגנטי הפועל על יחידת אורך המוליך בו זורם הזרם I_2. כוח זה הוא תולדה של השדה המגנטי הנוצר סביב המוליך הארוך בו זורם הזרם I_1. ניתן לראות בקלות שאותו ביטוי מתאר גם את גודל הכוח המגנטי הפועל על יחידת אורך במוליך בו זורם זרם I_1, כתוצאה מהשדה המגנטי הנוצר סביב המוליך הארוך בו זורם הזרם I_2.

דוגמה 2:

עוצמת כל אחד מהזרמים בשני מוליכים ארוכים ומקבילים היא $I_1 = I_2 = 25A$. המרחק בין המוליכים הוא 2cm. חשב את כוח המשיכה המגנטי הפועל על 0.5m של כל מוליך.

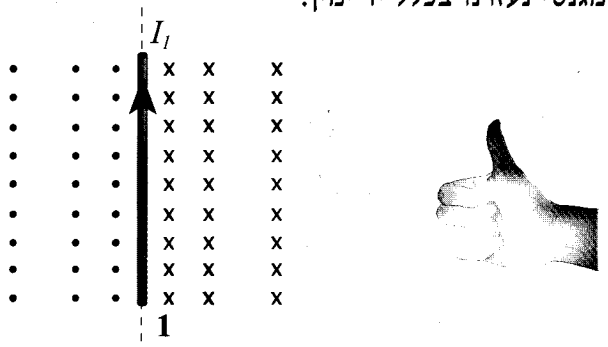
פתרון:

$$\left(\frac{F}{l}\right)\cdot l = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}\cdot l = \frac{4\pi\cdot 10^{-7}(25)^2}{2\pi\cdot 2\cdot 10^{-2}}\cdot 0.5 = 3.125\cdot 10^{-3}\,N$$

מספר דגשים:

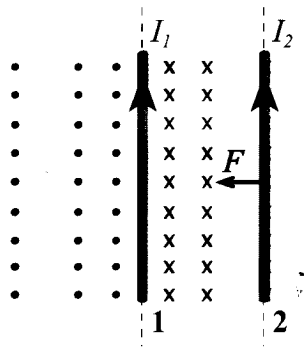
אם הזרמים זורמים באותה מגמה, המוליכים נמשכים זה לזה; אם מגמת הזרמים הפוכה, נוצר בין המוליכים כוח דחייה. נתאר את השיקולים שמהם ניתן להסיק מסקנה זו.

באיור מתוארים מוליך ארוך מאוד, שדרכו זורם זרם I_1, וחלק מקווי השדה המגנטי סביבו. לקביעת כיוון קווי השדה המגנטי נעזרנו בכלל יד ימין:



איור 5: כיוון עוצמת השדה המגנטי סביב תייל מס' 1

נציב מוליך שני בשדה המגנטי שנוצר על ידי המוליך הראשון. נבחן באמצעות "כלל יד שמאל" את כיוון הכוח המגנטי הפועל על המוליך השני, בו עוצמת הזרם היא I_2:

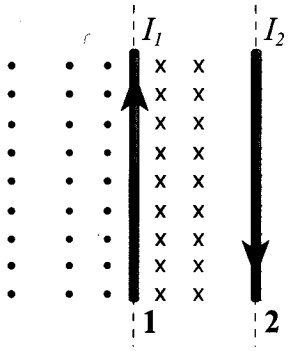


איור 6: תייל מס' 2 נמצא בשדה המגנטי שנוצר על ידי הזרם בתייל מס' 1

כפי שניתן לראות באיור 6, תייל 2 נמשך אל תייל 1, כלומר התיילים נמשכים זה לזה.
את העובדה שתייל 1 נמשך ימינה אפשר להסיק מהחוק השלישי של ניוטון. לחילופין, אפשר לבדוק את הכוח המגנטי על תייל 1 הנמצא בשדה המגנטי של תייל 2 באופן שניתחנו את כיוון הכוח הפועל על תייל 2.

תרגיל לבדיקה עצמית:

באיור מתוארים שני זרמים מקבילים, הפוכים במגמתם. נתח את כיווני הכוחות המגנטיים הפועלים על כל תייל במקרה זה.
הדרכה: התייחס לאחד התיילים "כמקור של שדה מגנטי" ובדוק את הכוח המגנטי ששדה זה מפעיל על הזרם שבתייל השני. עתה בדוק את כיוון הכוח המגנטי על התייל האחר.
אם פעלת נכון, מצאת שבין התיילים פועל כוח דחייה.



איור 7: מהו כיוון הכוח המגנטי על תייל מס' 2? ועל תייל מס' 1?

8.3 הגדרת האמפר בשיטת היחידות SI

המשוואה האחרונה שהוצגה בסעיף 2-8 היא הבסיס להגדרת יחידת האמפר בשיטת היחידות SI:

הגדרה

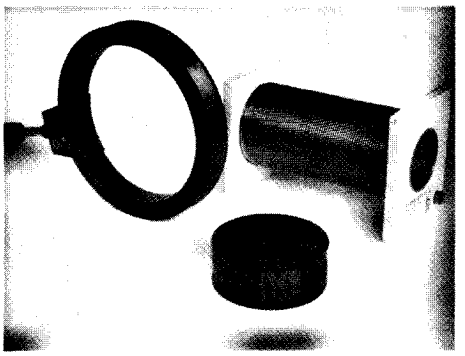
בעזרת הגדרת יחידת האמפר אפשר לחזור ולהגדיר מחדש את יחידת הקולון:

הגדרה

[3] בתנאי שהמוליכים מצויים בריק.

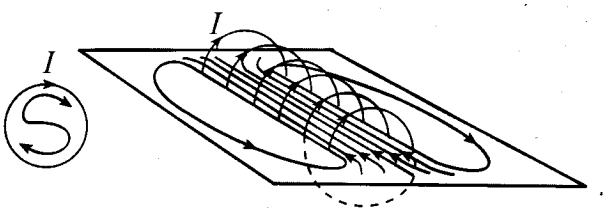
8.4 השדה המגנטי של סליל דק ושל סילונית

כפי שנאמר בפרק זה, כיוון עוצמת השדה המגנטי נקבע על פי "כלל יד ימין".
למען הבהירות, נצרף כאן תמונה של "סליל דק" ושל "סילונית ארוכה". במושגים אלו נעסוק לרוב בהמשך הפרק, ומן הראוי שהכינויים יהיו ברורים.



איור 8: **תצלום** של סלילים. בשורה העליונה סליל דק (בצד שמאל) וסליל ארוך-"סילונית"

אם $R >> l$, כאשר l מסמן את אורך הסליל, נתייחס לסליל כאל "סליל דק".
אם $R << l$, נתייחס לסליל כאל "סליל ארוך", או "סילונית ארוכה".
קווי השדה המגנטי במרכזו של סליל ארוך מקבילים (בקירוב טוב).

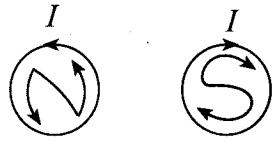


איור 9: השדה המגנטי במרכז סליל ארוך. הקצה הקרוב של הסליל הוא **קוטב דרומי**

ראוי לשים לב לעובדות הבאות:
השדה המגנטי של הסילונית הארוכה דומה בצורתו לשדה של מוט מגנטי.
אם אנו מסתכלים לאורך ציר הסילונית, והזרם מכוון בכיוון סיבוב מחוגי השעון, אנו מביטים אל הקוטב הדרומי של שדה הסליל - ראה איור 9.
ולהיפך, אם זרם הסליל מכוון נגד כיוון סיבוב מחוגי השעון, אנו מביטים אל הקוטב הצפוני של שדה הסליל - בהתאם ל"כלל יד ימין", ובהתאם להסכם לפיו קווי השדה המגנטי יוצאים מקוטב צפוני של מגנט ונכנסים לקוטב הדרומי שלו.

איור 10: כשהזרם בסליל זורם נגד כיוון סיבוב מחוגי השעון, קווי השדה פונים אל הקורא.

כריכה בודדת, אף היא מקיימת כלל זה, והיא מתנהגת כ"מישור מגנטי" אשר צידו האחד הוא קוטב דרומי והאחר קוטב צפוני, כמתואר באיורים:



איור 11: כריכה בודדת מתנהגת כמו מישור מגנטי שצידו האחד "צפון " והשני "דרום".

ביו וסבר מצאו בדרך ניסיונית את גודל עוצמת השדה המגנטי במרכז כריכה מעגלית ברדיוס R שנושאת זרם I. הביטוי שהתקבל מתוך ניתוח הניסויים שביצעו הוא:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

N כריכות צמודות זהות ברדיוס R, המהוות יחד סליל דק, שעוצמת הזרם דרכן היא I, יוצרות שדה מגנטי במרכז הסליל בעוצמה:

$$B_N = N\frac{\mu_0 I}{2R}$$

סילונית היא אמצעי נוח ליצירת שדה מגנטי אחיד שעוצמתו ניתנת ע"י הביטוי:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI$$

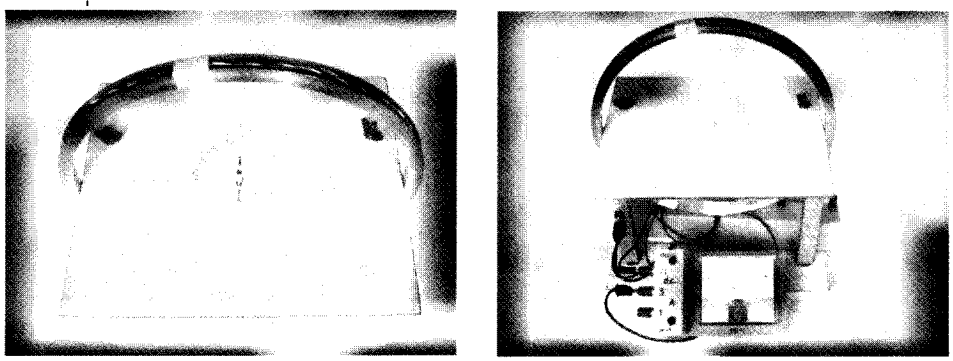
n מוגדר כמספר הכריכות ליחידת אורך, כלומר $n = \frac{N}{l}$; N מציין את מספר הכריכות ו– l הוא אורכו של הסליל. בהמשך נראה כיצד מתקבל ביטוי זה מחוק אמפר, שיוצג בסעיף 8.7 .

8.5 עקרון הסופרפוזיציה של שדות מגנטיים

עוצמת השדה המגנטי הינה גודל וקטורי. לפי עקרון הסופרפוזיציה, העוצמה השקולה של שני שדות מגנטיים היא **הסכום הווקטורי של עוצמות השדות.**
כדוגמה למציאת השקול של עוצמות שדה מגנטי, נתאר כאן **ניסוי למדידת עוצמת השדה המגנטי** של כדור הארץ.

הגלוונומטר הטנגנטי

הגלוונומטר הטנגנטי מורכב למעשה מסליל דק, סוללה, מד זרם ונגד משתנה המאפשר שליטה על עוצמת זרם הסליל. מניחים במרכז הסליל מצפן אופקי - כמתואר באיור 12.

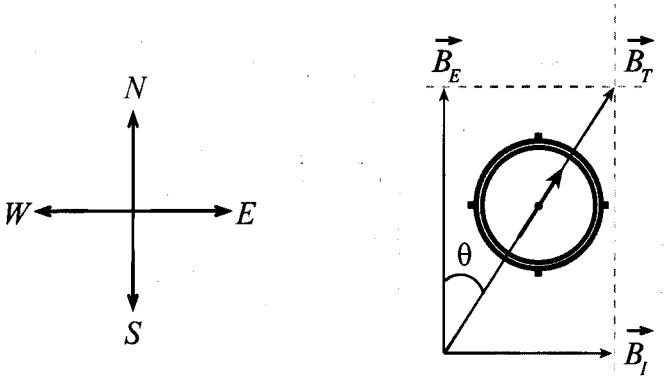


12: תצלום של גלוונומטר טנגנטי

בתחילת המדידות, מציבים את מישור הסליל במישור אנכי צפון-דרום. במצב זה, כיוון המצפן ומישור הסליל מתלכדים.
עתה מזרימים זרם בסליל. הסליל המוזרם יוצר שדה מגנטי בניצב למישור הכריכות, ולכן כיוון עוצמת השדה המגנטי של הסליל הוא מזרח-מערב (או מערב-מזרח, בהתאם לכיוון הזרם). כתוצאה משדה הסליל, המצפן משנה את כיוונו. בזמן שזורם זרם בסליל, מחט המצפן מתייצבת לפי **שקול עוצמות השדות** המגנטיים **של** הארץ ושל הסליל.
נסמן ב-B_E את עוצמת השדה המגנטי של הארץ[4]. את עוצמת השדה המגנטי של הסליל נסמן ב-B_I. כפי שהוסבר, **במערכת הניסויית, שני שדות אלה מאונכים זה לזה.**

נסמן את הזווית של מחט המצפן יחסית לצפון ב- θ. האיור הבא מתאר את הווקטורים $\vec{B}_E$ ו-$\vec{B}_I$ ואת הזווית θ:

[4] בגלוונומטר טנגנטי אפשר למדוד למעשה **רק את הרכיב האופקי** של עוצמת השדה המגנטי הארצי.



איור 13: המצפן מתייצב בכיוון העוצמה השקולה של השדות המגנטיים

מהאיור ניתן לראות שבין עוצמת השדות המגנטיים מתקיים הקשר :

$$\frac{B_I}{B_E} = \tan\theta$$

כאשר העוצמה המגנטית של הסליל היא:

$$B_I = N\frac{\mu_0 I}{2R}$$

מצירוף שני הביטויים האחרונים מתקבל:

$$B_E = \frac{B_I}{\tan\theta} = \frac{\mu_0 NI}{2R\tan\theta}$$

$$\tan\theta = \frac{\mu_0 N}{2RB_E}\cdot I$$

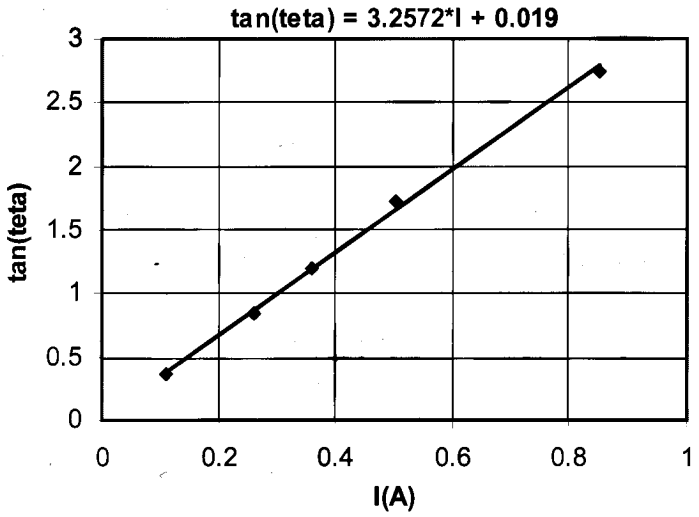
בניסוי מספר הכריכות N ורדיוס כריכות הסליל R ידועים. עוצמת הזרם I נמדדת באמפרמטר והזווית θ נמדדת על ידי המצפן. ידיעת כל הגורמים הללו מאפשרת למדוד את הרכיב האופקי של עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ.

ניתוח תוצאות הניסוי: "מדידת הרכיב האופקי של עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ באמצעות גלוונומטר טנגנטי". תלמיד ביצע את הניסוי שתואר בסעיף זה ובמדידותיו התקבלו התוצאות הבאות:

עוצמת הזרם I(A)	זווית סטיית המצפן θ°	tan θ
0.11	20	0.36
0.25	40	0.84
0.36	50	1.19
0.53	60	1.73
0.85	70	2.75

איור 14: טבלת התוצאות שנמדדו בניסוי בגלוונומטר טנגנטי

התלמיד שרטט גרף $\tan\theta$ כפונקציה של עוצמת זרם הסליל - I והתקבל:



איור 15: גרף טנגנס הזווית של סטיית מחוג המצפן כפונקציה של עוצמת זרם הסליל

משוואת הישר רשומה בראש הגרף. נתוני המערכת הניסויית היו:
מספר הליפופים בסליל $N = 15$, רדיוס הכריכות $R = 12cm$.

שיפוע הגרף, אותו ניתן לראות ב"משוואת הישר" מייצג את הערך: $\frac{\mu_0 N}{2RB_E} = 3.2572$.

על ידי הצבת הקבועים בניסוי מתקבל עבור הרכיב האופקי של עוצמת השדה המגנטי הערך שנמדד בניסוי: $B_E = 2.41\cdot10^{-5}T$. התוצאה המתקבלת בניסויים מדוקדקים היא $2.9\cdot10^{-5}T$.
לסיכום, שתי הערות:

- "גלוונומטר" הוא כינוי למד זרם. ואכן, אם ערך השדה המגנטי ידוע, המכשיר שתואר כאן יכול לשמש כמד זרם – ראה שאלה 27 בפרק זה.
- "טנגנטי" - כינוי זה נגזר מן הביטוי המתמטי המבטא את הקשר בין עוצמות השדות המגנטיים B_I ו- B_E.

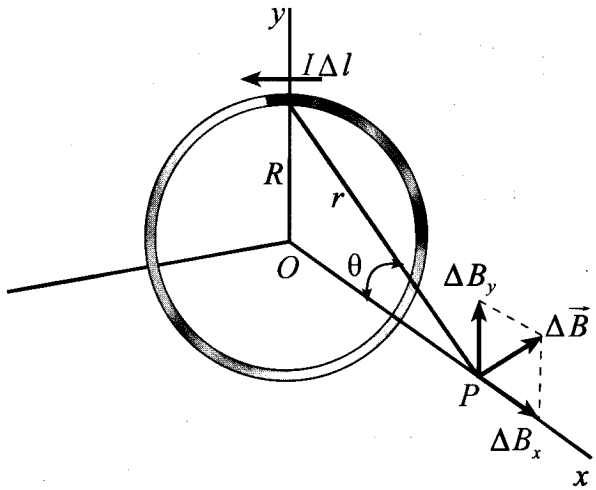
בחרנו כאן דוגמה שבה עוצמות השדות היו ניצבות זו לזו, אך במקרים רבים אין זה כך. בכל מקרה, הכלל הוא שעוצמות השדות המגנטיים מתחברות חיבור וקטורי, ומקיימות את עיקרון הסופרפוזיציה, ואין זה חשוב אם מקורו של השדה המגנטי הוא סליל שזורם בו זרם, מגנט קבוע או גוף בעל תכונות מגנטיות ככדור הארץ.

8.6 הכתיבה הפיזיקלית של חוק ביו וסבר[5] - הרחבה

חוק ביו-סבר קובע: גודל קטע מוליך באורך Δl הנושא זרם I תורם לעוצמת השדה B בנקודה P, תרומה שגודלה ΔB המקיימת:

$$\Delta\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I\Delta l \sin\theta}{r^2}$$

כאשר r הוא המרחק בין הנקודה P לבין הקטע Δl, ו- θ היא הזווית בין r ל- Δl, כפי שניתן לראות באיור 16.



איור 16: קטע Δl של תייל בו זורם זרם I, יוצר שדה מגנטי ΔB בנקודה P.

סכום הווקטורים של כל התרומות $\Delta\vec{B}$, בנקודה מסוימת, הוא עוצמת השדה המגנטי $\vec{B}$ בנקודה זו. נעיר שחוק ביו-סבר נכון למוליך כלשהו, אך מהבחינה המעשית מסלולי זרם סגורים הם בעלי חשיבות רבה ביצירת שדות מגנטיים בסלילים, שהם חלק בלתי נפרד ממכשירי חשמל רבים.

דוגמה 3:

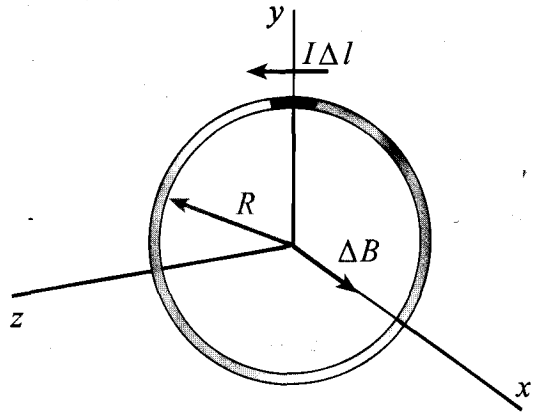
חשב באמצעות חוק ביו-סבר את עוצמת השדה המגנטי במרכזה של כריכה ברדיוס R הנושאת זרם I.

פתרון:

נבחר מערכת צירים תלת ממדית, שראשיתה במרכז הכריכה כך שציר ה-x יהיה מאונך למישור הכריכה (ראה איור 17). נחלק את הכריכה למקטעים זעירים של זרם חשמלי באורך Δl.

[5] הרחבה, הנושא אינו נכלל **בתכנית הלימודים** החדשה.

דוגמא 3- הביטוי



איור 17: חישוב עוצמת השדה המגנטי במרכזה של כריכה

התרומה לגודל עוצמת השדה המגנטי של כל מקטע היא:

$$\Delta\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I\Delta l \sin\alpha}{r^2}$$

במקרה הפרטי המתואר, אם נרצה לחשב את עוצמת השדה המגנטי במרכז הכריכה, הגודל r המופיע בנוסחה זו הוא רדיוס הכריכה R, והזווית θ היא בת 90°. מכאן ניתן להסיק שהתרומה של כל מקטע שזורם בו זרם לגודל עוצמת השדה במרכז הכריכה היא:

$$\Delta\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I\Delta l}{R^2}$$

כיוון וקטור עוצמת השדה שנוצר במרכז הכריכה (בראשית הצירים) על ידי הזרם דרך המקטע Δl הנמצא במישור (yz) הוא לאורך הציר x. עוצמת השדה המגנטי נובעת מסך כל המקטעים של הזרם. כל המקטעים Δl של הכריכה יוצרים וקטורי $\Delta\vec{B}$ מכוונים על ציר ה- x ולכן:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2}(\Delta l_1 + \Delta l_2 + ...)$$

סכום האיברים בסוגריים מסתכם להיקף הכריכה $2\pi R$, לכן:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

קשר זה עומד בהתאמה מלאה עם הממצאים הניסיוניים של ביו וסבר.

דוגמה 4

כריכה מעגלית ברדיוס a =10 cm עשויה נחושת. לנחושת התנגדות סגולית $1.72\cdot10^{-8}\ \Omega\cdot m$.
הכריכה מחוברת לסוללה אידיאלית $\varepsilon = 9V$. שטח החתך של תייל הנחושת הוא $A = 3\cdot10^{-6}m^2$.

א. חשב את עוצמת השדה המגנטי במרכז הכריכה.

ב. מנתקים את הסוללה, ומותחים את התייל כך שמתקבל תייל ארוך פי 2 מאורכו המקורי. יוצרים מהתייל המוארך כריכה מעגלית, ומחברים אותו שוב לסוללה. חשב את עוצמת השדה המגנטי במרכזה של כריכה זו.

<u>פתרון</u>:

א. נחשב תחילה את התנגדות הכריכה על פי הקשר:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

אורך המוליך שממנו עשויה הכריכה הוא $L = 2\pi r$, לכן:

$$R = \frac{\rho 2\pi a}{A} = \frac{1.72\cdot10^{-8}\cdot2\cdot\pi\cdot0.1}{3\cdot10^{-6}} = 3.6\cdot10^{-3}\Omega$$

נחשב את הזרם בכריכה על פי חוק אוהם:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{9}{3.6\cdot10^{-3}} = 2.5\cdot10^{3}A$$

עתה נחשב את עוצמת השדה המגנטי במרכז הכריכה:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot2.5\cdot10^{3}}{2\cdot0.1} = 1.57\cdot10^{-2}T$$

ב. ההתנגדות החדשה, לאחר שהחוט הוארך פי 2 (כאשר אורכו של המוליך גדל פי 2, שטח חתכו קטן פי 2 כי נפחו אינו משתנה) היא:

$$R^* = \frac{\rho 2(2\pi a)}{\frac{A}{2}} = 4R = 4\cdot3.6\cdot10^{-3} = 1.44\cdot10^{-2}\Omega$$

עוצמת הזרם החדשה I^* היא עתה:

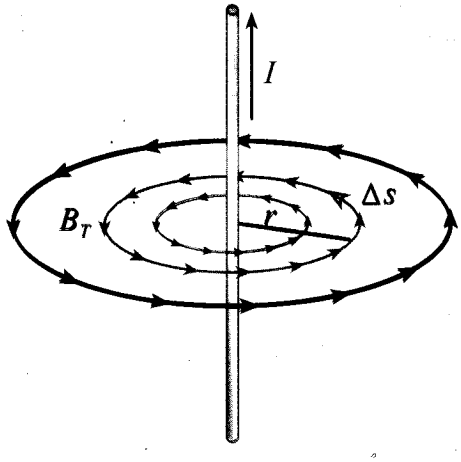
$$I^* = \frac{\varepsilon}{R^*} = \frac{\varepsilon}{4R} = \frac{I}{4} = \frac{2.5\cdot10^{3}}{4} = 625A$$

נחשב את עוצמת השדה B^*:

$$B^* = \frac{\mu_0 I^*}{2a^*} = \frac{\mu_0\frac{I}{4}}{2\cdot2a} = \frac{1}{8}B = \frac{1.57\cdot10^{-2}}{8} = 1.96\cdot10^{-3}T$$

8.7 חוק אמפר[6] (Ampère)

בנוסף לחוק ביו-סבר, קיים חוק המאפשר לחשב את עוצמת השדה המגנטי סביב זרם חשמלי. חוק זה נקרא חוק אמפר, והוא דומה במובן מסוים לחוק גאוס, המאפשר לחשב את עוצמת השדה החשמלי במערכות של מטענים הנמצאים בשיווי משקל אלקטרוסטטי. חוק אמפר מקשר בין הרכיב המשיקי של עוצמת השדה המגנטי שעל פני קו עקום סגור המקיף את הזרם, לבין עוצמת הזרם הנקודתית העובר דרך השטח המוקף על ידי הקו העקום. מחקירת הניסוי שביצע ארסטד (Örsted) בשנת 1920 למדנו שקווי השדה המגנטי סביב מוליך הנושא זרם, יוצרים מעגלים שמרכזם בתייל. ניתן לקבוע את כיוון עוצמת השדה $\vec{B}$ על פי "כלל יד ימין". עוד למדנו מניסוי זה שעוצמת השדה המגנטי היא ביחס ישר לעוצמת הזרם וביחס הפוך למרחק r מהתייל.



איור 18: חוק אמפר מקשר את עוצמת הזרם עם עוצמת השדה המגנטי

נתמקד במקרה פרטי-מסלול מעגלי המקיף את התייל הנושא זרם במרחק r ממנו. נחלק את המסלול לקטעים באורך Δs (ראה איור 18). נסמן את גודל עוצמת השדה המגנטי המשיקי בנקודה שלאורך המסלול ב- B_T , וב- $\sum I$ את הסכום האלגברי של הזרמים העוברים דרך השטח המוקף על ידי המסלול המעגלי. את חוק אמפר ניתן לכתוב באופן הבא:

---

[6] יש לראות גם סעיף זה במסגרת הרחבה והעמקה מעבר לתוכנית הלימודים המחייבת.

$$\sum B_T \cdot \Delta s = \mu_0 \sum I$$

באגף שמאל זהו סיכום על פני מסלול מעגלי סגור שהיקפו $2\pi r$.

אם הסכום המופיע באגף שמאל מחושב באמצעות "אינטגרל במסלול סגור", חוק אמפר ייכתב:

$$\oint \vec{B}_T \cdot d\vec{s} = B_T \oint ds = \mu_0 \sum I$$

תפקידה של המכפלה הסקלרית באגף השמאלי של המשוואה האחרונה הוא לדאוג לכך שמתחשבים רק ברכיב המשיקי של וקטור עוצמת השדה.

(נזכיר שמשמעותה של מכפלה סקלרית היא: $\vec{B} \cdot d\vec{s} = B \cdot \cos\alpha \cdot ds$).

כל אחת מהמשוואות האחרונות מבטאת את חוק אמפר.

חישוב עוצמת השדה סביב תייל מולך ארוך

אם ניישם את חוק האמפר לגבי תייל ישר וארוך, בו עוצמת הזרם היא I, נוכל לחשב את עוצמת השדה המגנטי B במרחק r מהתייל:

$$\oint \vec{B}_T \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

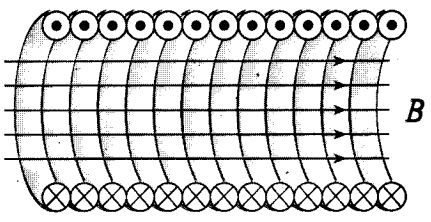
$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

אף שהדגמנו את חוק אמפר במקרה של מוליך ישר, הוא ניתן ליישום במגוון מצבים סימטריים, כפי שנראה בהמשך. נדגים את יישומו של חוק אמפר לחישוב עוצמת השדה המגנטי במרכזה של סילונית ארוכה.

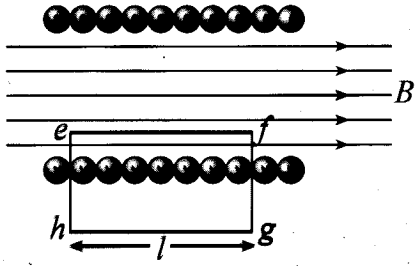
דוגמה 5

בסילונית אידיאלית שאורכה "אינסופי", קווי השדה המגנטי בתוך הסילונית מקבילים לציר הסילונית (ראה איור 19), ומחוץ לסילונית, עוצמת השדה המגנטי זניחה. נקיף קטע מהסילונית באורך l במלבן שנסמן באותיות efgh (איור 20), ונחשב את ערכו של הסכום $\sum B_T \Delta s = \mu_0 I$ לאורך המלבן.



איור 19: חתך של סליל ארוך.
באיור מסומנים כיוון הזרם
בסליל וכיוון השדה המגנטי.

בהתקדמות לאורך הצלע e→f בלבד יש לשדה המגנטי רכיב מקביל לכיוונו של Δs. המלבן מקיף N כריכות שדרך כל אחת מהן זורם זרם I, לכן החישוב מצטמצם לביטוי:



איור 20: יישום חוק אמפר לחישוב
השדה המגנטי של סילונית

$$\sum B_T \Delta s = Bl = \mu_0 NI$$

ומכאן:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI$$

כאשר הגודל $n = \frac{N}{l}$ מייצג את צפיפות הכריכות ליחידת אורך.

כאמור, סילונית היא אמצעי יעיל ליצירת שדה מגנטי אחיד בעל עוצמה נשלטת. עוצמת השדה המגנטי במרכז הסילונית פרופורציונית לעוצמת הזרם ולצפיפות הכריכות. (בסילונית נתונה, עוצמת השדה המגנטי במרכזה פרופורציונית לעוצמת זרם הסילונית).

דוגמה 6

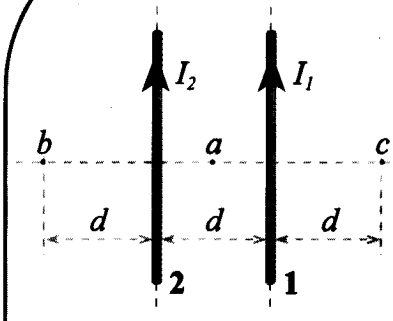
סילונית שאורכה 25cm מכילה 5000 ליפופים. חשב את עוצמת השדה המגנטי המרבי במרכז הסילונית, אם מותר להזרים בה זרם שערכו אינו עולה[7] על 6A.

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{5000}{0.25} 6 = 0.15T$$

ערך זה גדול פי 3750 בקירוב מעוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ.

נסיים סעיף זה במספר דוגמאות נוספות כדי להמחיש את עיקרון הסופרפוזיציה של שדות מגנטיים.

דוגמה 7



שני תיילים מקבילים הנושאים זרמים בעלי עוצמה שווה $I = I_1 = I_2$ נמצאים במרחק d זה מזה. רשום ביטוי לעוצמת השדה המגנטי בנקודות a,b,c.

פתרון:

נעזר ב"כלל יד ימין" לקביעת כיוון השדה המגנטי הנוצר על ידי כל אחד מהתיילים בכל נקודה.

עוצמת השדה המגנטי בנקודה a היא אפס כי בנקודה זו התיילים יוצרים שדות שווים בגודלם והפוכים בכיוונם.

בנקודה b, שני התיילים יוצרים שדה מגנטי היוצא מהדף, לכן עוצמת השדה השקול תהיה בכיוון היוצא מהדף, וגודלה יהיה:

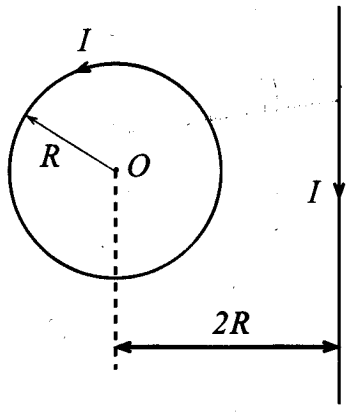
$$B_b = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} + \frac{\mu_0 I}{2\pi(2d)} = \frac{3}{4}\frac{\mu_0 I}{\pi d}$$

מבחינת המרחקים מהתיילים, הנקודה c סימטרית לנקודה b ולכן בשתי הנקודות b ו-c עוצמת השדה שווה. ההבדל הוא שבנקודה c כיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף.

[7] **ליפופים נוגעים זה בזה ולכן התייל המלופף צריך להיות עטוף בשכבה מבודדת. בדרך כלל, לכה בשכבה דקה מאוד משמשת כחומר מבודד. זרם גדול עלול לגרום להתחממות הסליל, להתכת הלכה ולקצר בסליל.**

דוגמה

כריכה מעגלית בעלת רדיוס R ותייל ארוך מאוד נמצאים במישור אחד. בתייל ובכריכה זורמים זרמים שווי עוצמה I בכיוונים המתוארים באיור. חשב את עוצמת השדה המגנטי השקול במרכז הכריכה O, הנגרמת על ידי זרמים אלה.



פתרון:

בנקודה O כיוון השדה המגנטי של זרם התייל הארוך (על פי "כלל יד ימין") הוא לתוך הדף וערכו:

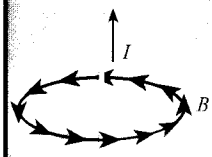
$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot 2R} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$$

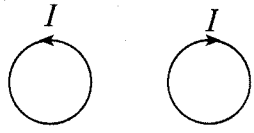
זרם הכריכה יוצר בנקודה O שדה המכוון החוצה מהדף, כלומר אל הקורא, וערכו:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

$B_2 > B_1$, לכן וקטור השדה השקול יהיה בכיוון B_2 , כלומר החוצה מהדף, וערכו:

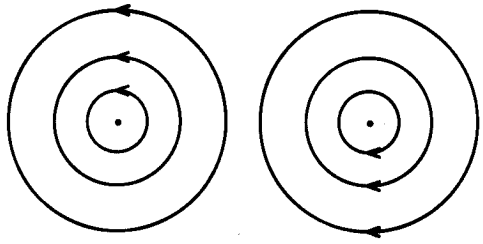
$$B_2 - B_1 = \frac{\mu_0 I}{2R} - \frac{\mu_0 I}{4\pi R} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(2\pi - 1)$$


I
B


I
I

תרגילים לפרק 8

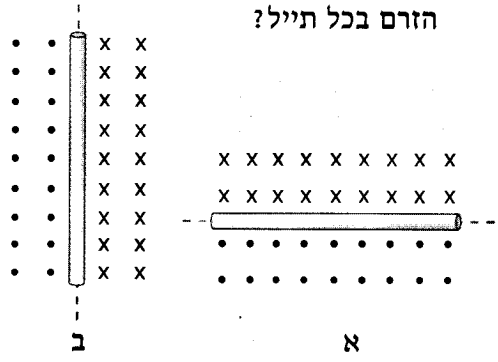
1. באיור קווי שדה מגנטי הנוצרים סביב זרם חשמלי.



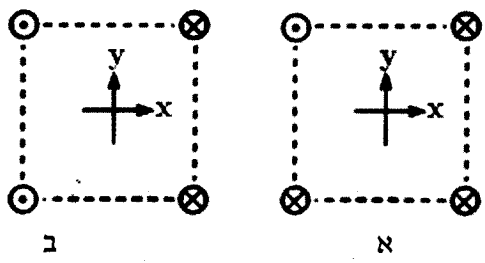
א. מהו כיוון הזרם החשמלי בכל מקרה?

ב. במקרה אחר, קווי שדה אלה נוצרו על ידי אלומת אלקטרונים. מהו כיוון תנועת האלקטרונים באלומה, שעשוי ליצור את השדות באיור?

2. באיור קווי שדה מגנטי הנוצרים סביב תייל דרכו זורם זרם חשמלי. מהו כיוון הזרם בכל תייל?

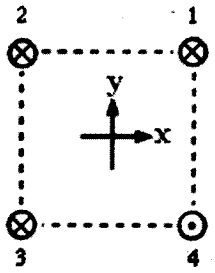


3. ארבעה תיילים מקבילים, ישרים וארוכים עוברים דרך קודקודי ריבוע, במאונך לדף. עוצמות הזרמים בתיילים שוות.



מהו כיוונה של עוצמת השדה המגנטי השקול במרכז הריבוע בכל אחד מהמקרים?

4. ארבעה תיילים ארוכים ומקבילים מאונכים לשולחן בקודקודי ריבוע. הזרמים שווים בעוצמתם וכיוונם מתואר באיור.
הזנח את השפעת השדה המגנטי הארצי.



א. באיזה כיוון תתייצב מחט מצפן במרכז הריבוע?

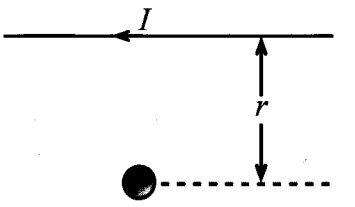
ב. מהו כיוון השדה המגנטי הנוצר על ידי תיילים 1,2,3 בקודקוד 4.

ג. מהו כיוון הכוח המגנטי הפועל על תייל מספר 4?

5. עוצמת הזרם בתייל ארוך וישר היא 60A. במרחק r מהתייל עוצמת השדה המגנטי היא $3\cdot10^{-4}T$.
חשב את המרחק r.

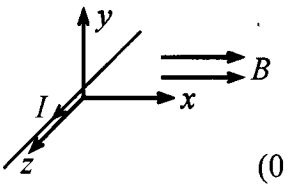
6. ברק נושא 16C של מטען חשמלי. כאשר נוצר ברק, מטען זה עובר בין הענן לבין האדמה תוך 1.2ms. בהנחה שניתן להתייחס לברק כאל זרם חשמלי ישר וארוך שעוצמתו קבועה, חשב את עוצמת השדה המגנטי במרחק 15m מהברק.

7. אלקטרון חולף במהירות $5\cdot10^{6}m/s$ במרחק 3cm מתייל ארוך הנושא זרם שעוצמתו 25A (ראה תרשים). חשב את הכוח המגנטי (גודל וכיוון) הפועל על האלקטרון כאשר הוא נע בכיוונים הבאים:



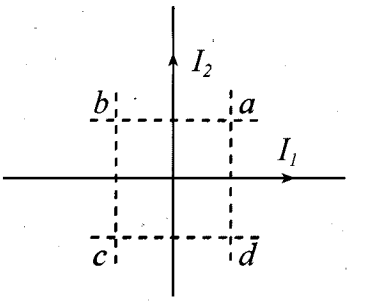
א. ימינה.
ב. לתוך הדף.
ג. כלפי מעלה.

8. תייל ארוך וישר נושא זרם שעוצמתו 10A **מתוח על ציר** z, (ראה איור). התייל נמצא **בתחום** בו נמצא שדה מגנטי אחיד שכיוונו x+ וגודלו 10^{-6}T. מצא את **עוצמת** השדה המגנטי השקול **במקומות הבאים**:



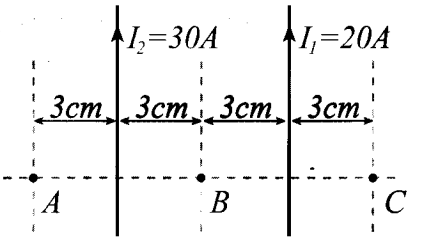
א. (0 , 2m)
ב. (2m , 0)
ג. (0 , -0.5m)

9. **שני תיילים ארוכים נושאים זרמים של** $I_1 = 5A$ **ו-** $I_2 = 3A$. חשב את עוצמת **השדה המגנטי** B (גודל וכיוון) בנקודות **ששיעוריהן**:

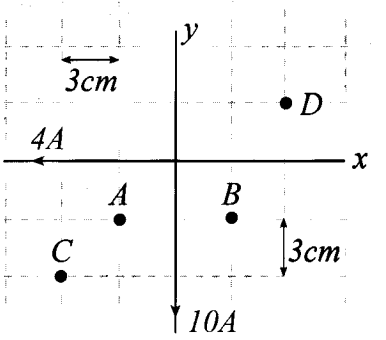


א. a: (0.2m , 0.2m)
ב. b: (-0.2m , 0.2m)
ג. c: (-0.2m , -0.2m)
ד. d: (0.2m , -0.2m)

10. שני תיילים מקבילים וארוכים נושאים זרמים כמתואר באיור. מהי עוצמת השדה המגנטי, ומה כיוונו בנקודות A, B ו- C?

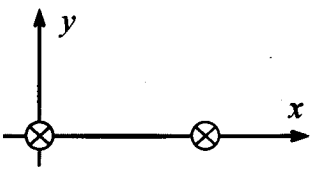


11. שני תיילים ארוכים מונחים לאורך הצירים xy כמתואר באיור. מהי עוצמת השדה המגנטי, ומהו כיוונו בנקודות:



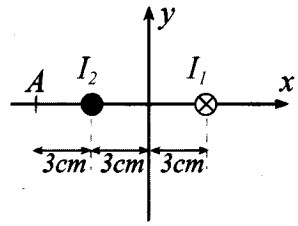
א. A
ב. B
ג. C
ד. D

12. שני תיילים ארוכים ומאונכים למישור הדף נושאים זרמים **שעוצמתם** I = 5A, וכיוונם לתוך הדף. תייל אחד מונח בראשית הצירים, **והאחר** מונח ב- x = 4cm. חשב את **עוצמת** השדה המגנטי **ואת כיוונו במקומות הבאים**:



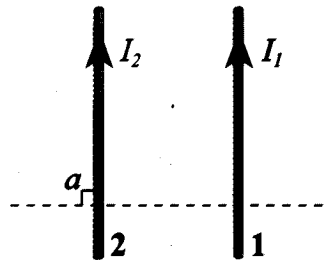
א. (2cm , 0)
ב. (6cm , 0)
ג. (2cm , 2cm)

13. שני תיילים ארוכים ומקבילים נושאים זרמים $I_1 = 5A$ המכוון לתוך הדף, וזרם I_2 שכיוונו ועוצמתו אינם ידועים. התיילים מאונכים למישור הדף. עוצמת השדה המגנטי השקול בנקודה A היא אפס.

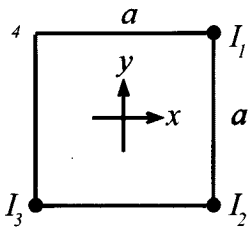


א. מהי עוצמת הזרם I_2, ומה כיוונו?
ב. מהי עוצמת השדה המגנטי בראשית הצירים?

14. המרחק בין שני תיילים ארוכים ומקבילים הוא 1.2m. עוצמות הזרמים מקיימות את הקשר $I_2 = 0.25I_1$. התיילים והישר a מאונכים זה לזה, ונמצאים במישור משותף. באיזה מרחק מתייל 1, לאורך a, מתאפס השדה המגנטי?

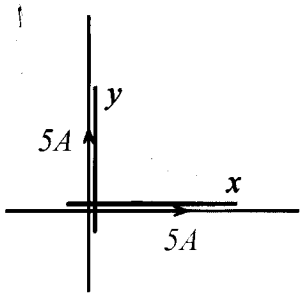


15. שלושה תיילים מקבילים וארוכים חודרים לתוך הדף בשלושה מקודקודי ריבוע. אורך צלע הריבוע a. עוצמות הזרמים שוות: $I_1 = I_2 = I_3 = I$ בטא את עוצמת השדה המגנטי בקודקוד הרביעי כאשר:

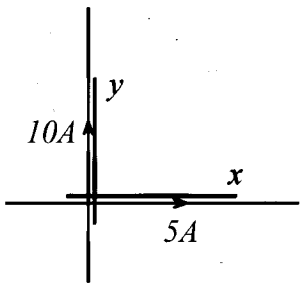


א. כל הזרמים יוצאים מהדף.
ב. I_1 ו-I_3 נכנסים לדף, I_2 יוצא מהדף.

* 16. שני תיילים ארוכים מאוד נמצאים במישור אחד, ומאונכים זה לזה. בכל אחד מן המקרים המתוארים באיורים א' ו-ב' קיים במישור התיילים ישר שלאורכו השדה המגנטי מתאפס.



איור א'

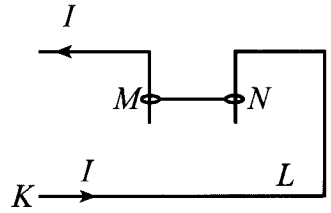


איור ב'

א. תאר במילים היכן נמצא ישר זה.
* ב. כתוב את משוואת הישר לכל מקרה.
* ג. מה ניתן להסיק לגבי יחס עוצמות הזרמים כאשר הישר שלאורכו השדה המגנטי מתאפס מקיים $y = 3x$?

17. תייל אופקי ארוך KL מונח על שולחן. מעליו נמצא תייל אופקי שני, MN, באורך 1m, חופשי להחליק מעלה מטה על שני עמודי מתכת זקופים. שני התיילים מחוברים ביניהם חיבור מוליך,

ועוצמת הזרם בהם היא 50A, מסת התייל המחליק היא 8g.



א. פתח ביטוי לגובה H כתלות בעוצמת הזרם I עבורו יהיה התייל המחליק בשיווי משקל.

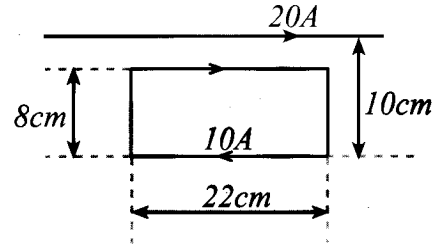
ב. באיזה גובה H מעל KL יימצא התייל המחליק בשיווי משקל?

ג. חשב ערכי H לזרמים בתחום מ-50A עד 100A, כל 10A. שרטט גרף של H כתלות ב-I_2.

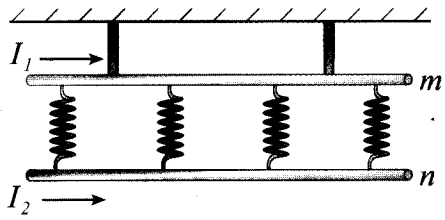
ד. חשב את שיפוע הגרף, וציין את יחידות השיפוע.

ה. איזה גודל פיסיקלי ניתן למדוד במערכת הניסוי שתוארה בשאלה?

18. בקרבת תייל ישר וארוך הנושא זרם נמצאת כריכה מלבנית, אף היא נושאת זרם. ממדי הכריכה נתונים באיור. חשב את הכוח המגנטי השקול הפועל על הכריכה ואת כיוונו.



**19. התיילים m ו-n מחוברים ביניהם בארבעה קפיצים זהים שמסתם זניחה. התייל m מחובר לתקרה (ומבודד ממנה), נושא זרם $I_1 = 120A$, והוא ארוך מאוד. אורכו של התייל n הינו 10m. האורך הרפוי של כל קפיץ הוא 8cm, וערך קבוע הקפיץ הוא k. כאשר $I_2 = 120A$ שני התיילים מתקרבים למרחק $d_1=1cm$ זה מזה. כאשר עוצמת הזרם בתייל התחתון היא $I_2' = 50A$, המרחק בין התיילים $d_2 = 12cm$.



א. האם כיוונם של הזרמים I_2 ו-I_2' כפי שמתואר באיור, או כיוונם מנוגד זה לזה?

ב. חשב את קבוע הקפיץ k.

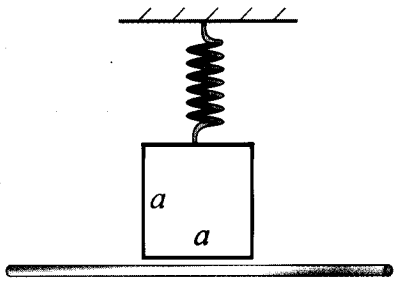
ג. חשב את מסת התייל התחתון.

ברגע מסוים מפסיקים את הזרם I_2' בתייל התחתון.

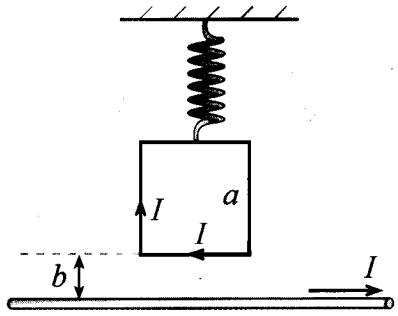
ד. מהו סוג התנועה של התייל התחתון?

ה. חשב את זמן המחזור של התנודות.

*20. מסגרת ריבועית מוליכה בעלת צלע a תלויה בקפיץ אנכי מעל תייל ישר וארוך. מסת הקפיץ זניחה. המסגרת נמצאת בשיווי משקל, כאשר הצלע התחתונה נוגעת כמעט בתייל – ראה איור א'.



איור א'



איור ב'

כאשר מזרימים זרם בתייל ובכריכה שעוצמתו I, הקפיץ מתכווץ למצבו הרפוי ואז מרחק הצלע מהתייל הוא b, ראה איור ב.

הבע באמצעות I, a, ו-b את:

א. מסת המסגרת m.

ב. את קבוע הקפיץ k.

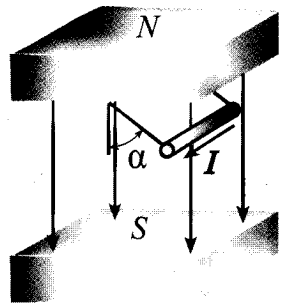
21. מוט מתכת באורך 25cm נושא זרם שעוצמתו 35A. המוט קשור בשני חוטי ניילון קלים למגנט העליון (ראה איור). מסת המוט $m = 2g$. שני המגנטים יוצרים שדה אחיד שגודל עוצמתו $B = 6.25mT$.

א. חשב את הזווית α המסומנת באיור.

ב. חשב את המתיחות בכל אחד מהחוטים הקושרים את המוט.

ג. פתח ביטוי לזווית α כפונקציה של עוצמת הזרם I במוט.

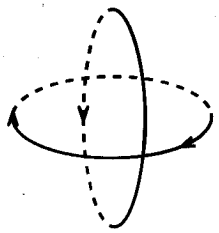
*ד. הוכח שהזווית $\alpha < 90°$ לכל I.



שדה מגנטי של כריכה מעגלית ושל סליל דק

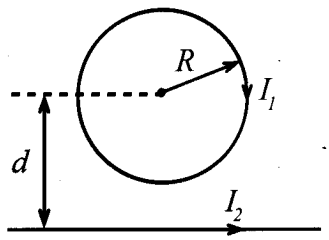
22. חשב את הרדיוס של כריכה מעגלית הנושאת זרם $I = 12.5A$, אם ידוע שעוצמת השדה המגנטי במרכזה היא $2 \cdot 10^{-4}T$.

23. לשתי כריכות מעגליות זהות רדיוס $R=5cm$ ומרכז משותף. מישורי הכריכות מאונכים זה לזה. עוצמת הזרם בכל אחת מהכריכות היא 1.6A. מהי עוצמת השדה המגנטי (גודל וכיוון) במרכז המשותף של הכריכות?

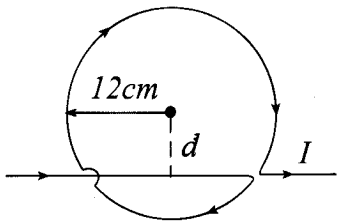


24. סליל מעגלי דק בעל רדיוס 7cm מכיל 30 כריכות. כאשר זורם בסליל זרם שעוצמתו I, גודל עוצמת השדה המגנטי במרכז הסליל היא $5 \cdot 10^{-6}T$. חשב את עוצמת הזרם בסליל.

25. כריכה מעגלית ברדיוס R ותייל ארוך נושאים זרמים שעוצמתם I_1 ו- $I_2 = 4.5I_1$ בהתאמה (ראה איור). עוצמת השדה המגנטי במרכז הכריכה היא אפס. בטא באמצעות R את המרחק d בין מרכז הכריכה לתייל.

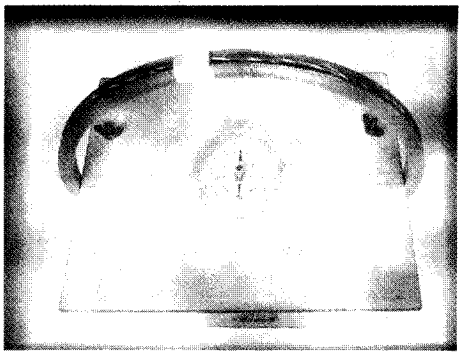


26. תייל ארוך מאוד יוצר לולאה מעגלית ברדיוס $R = 12cm$. חשב את המרחק d עבורו מתאפס השדה המגנטי במרכז הכריכה.



27. גלוונומטר טנגנטי יכול לשמש למדידה של עוצמת זרם. הגלוונומטר מורכב מסליל דק בעל n כריכות ברדיוס R, דרכן זורם זרם I שאת עוצמתו יש למדוד. מציבים את מישור הכריכות כך

שהשדה המגנטי הנוצר על ידי הזרם פונה לכיוון מזרח או לכיוון מערב. מניחים מצפן במרכז הסליל. אם אין זרם בסליל, המצפן מצביע צפונה. לעומת זאת אם בסליל זורם זרם, המצפן מראה זווית α יחסית לצפון. הרכיב האופקי של עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ הוא B_E.



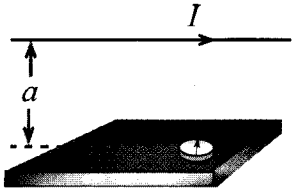
א. הראה שעוצמת הזרם בסליל ניתנת על ידי הביטוי:

$$I = \frac{2B_E R}{\mu_0 n}\tan\alpha$$

ב. בסליל 24 ליפופים ברדיוס 11cm, והזווית שמראה הגלוונומטר היא 30°. אם במקום בו מתבצע הניסוי $B_E = 3\cdot10^{-5}T$, מהי עוצמת הזרם בסליל?

28. לסליל ארוך (סולנואיד) 500 ליפופים צמודים. אורך הסליל $l = 25cm$. רדיוס הליפופים r קטן יחסית, ומתקיים $r << l$. התנגדות הסליל היא 1.5Ω. מחברים את הסליל לסוללה בעלת התנגדות פנימית 0.25Ω וכא"מ 4.5V. חשב את:
א. עוצמת הזרם בסליל.
ב. צפיפות הכריכות ליחידת אורך בסליל.
ג. עוצמת השדה המגנטי במרכז הסליל.

29. מצפן מונח על משטח אופקי. בגובה a מעל המצפן נמצא תיל ארוך וישר. כאשר אין זרם בתיל, מחט המצפן מקבילה לתייל. כאשר עוצמת הזרם בתייל היא 3A, מחט המצפן סוטה בזווית β מכיוונה המקורי.

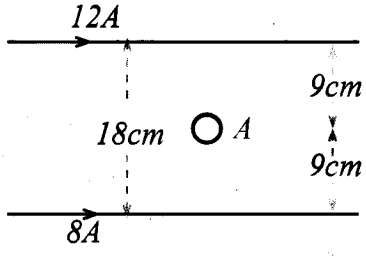


בניסוי המתואר משנים את הגובה a, משאירים את עוצמת הזרם בתייל קבועה, ומודדים את הזווית β. תוצאות הניסוי הן:

a(cm)	20	30	40	50	60
β^o	50.5	40	32.2	27	23

א. העתק את הטבלה. הוסף שורת ctgβ, ורשום את הערכים המתאימים.
ב. שרטט גרף ctgβ כתלות במרחק a.
ג. חשב מתוך הגרף את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ.
ד. בתום הניסוי, כאשר a = 20cm, מותחים תייל נוסף מעל התייל המקורי ובמקביל אליו, ומזרימים בו זרם בכיוון מנוגד לזרם שבתייל המקורי. המרחק בין התיילים הוא 50cm. מהי עוצמת הזרם בתייל הנוסף, אם מחט המצפן סוטה בזווית של 30°?

30. שני תיילים ארוכים נמצאים במרחק 18cm זה מזה במישור האופקי, ובהם עוצמות זרמים ככתוב באיור. בנקודה A, הנמצאת במרחק שווה משני התיילים, מציבים סליל מעגלי דק, המכיל 8 ליפופים ברדיוס 3cm, ומזרימים דרכו זרם שעוצמתו I_3 הגורם לאיפוס עוצמת השדה המגנטי בנקודה A. מישור הכריכה מתלכד עם מישור התיילים.
א. מהו כיוון הזרם בסליל? נמק תשובתך.
ב. מהי עוצמת הזרם בסליל?



פתרון תרגילים פרק 8

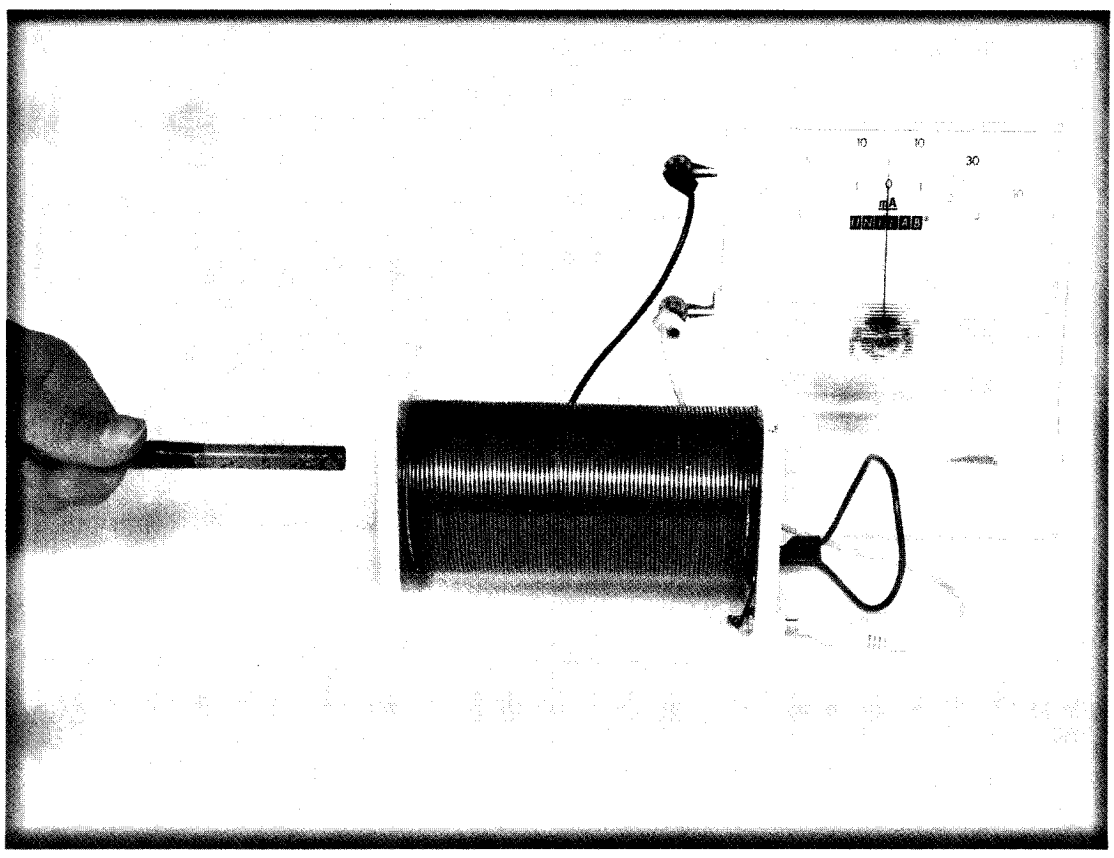
4. א. -135°
ב. -135°
ג. -45°
5. 4cm
6. $1.78\cdot10^{-4}T$
7. א. $1.33\cdot10^{-16}N$ למעלה
ב. 0
ג. $1.33\cdot10^{-16}N$ שמאלה
8. א. 0
ב. $1.41\cdot10^{-6}T$; 45°
ג. $5\cdot10^{-6}T$ ימינה
9. א. $2\cdot10^{-6}T$ החוצה מהדף
ב. $8\cdot10^{-6}T$ החוצה מהדף
ג. $2\cdot10^{-6}T$ לתוך הדף
ד. $8\cdot10^{-6}T$ לתוך הדף
10. א. $B_A = 2.44\cdot10^{-4}T$ החוצה מהדף
ב. $B_B = 6.66\cdot10^{-5}T$ לתוך הדף
ג. $B_C = 2\cdot10^{-4}T$ לתוך הדף
11. א. $4\cdot10^{-5}T$ לתוך הדף
ב. $9.33\cdot10^{-5}T$ החוצה מהדף
ג. $2\cdot10^{-5}T$ לתוך הדף
ד. $6.67\cdot10^{-6}T$ החוצה מהדף
12. א. 0
ב. $6.67\cdot10^{-5}T$ בכיוון $-y$
ג. $5\cdot10^{-7}T$ בכיוון $(+x)$
13. א. 1.67A החוצה מהדף
ב. $4.44\cdot10^{-5}T$ $(+y)$ בכיוון $(+y)$
14. 0.96m
15. א. $\frac{3\mu_0 I}{2\pi a\sqrt{2}}$ בזווית 45° ברביע 3
ב. $\frac{\mu_0 I}{2\pi a\sqrt{2}}$ בזווית 45° ברביע 1

16. ב. $y = x$
$y = 0.5x$
ג. $I_y = (1/3)\cdot I_x$
17. א. $H = \frac{\mu_0 I^2 L}{2\pi mg}$
ב. $6.25\cdot10^{-3}m$
ד. $2.5\cdot10^{-6}m/A^2$
18. $3.52\cdot10^{-4}N$ למעלה
19. ב. 6.77 N/m
ג. 98.63g
ה. 0.38s
20. א. $\frac{\mu_0 I^2 a}{2\pi g(a+b)}$
ב. $\frac{\mu_0 I^2 a}{2\pi b(a+b)}$
21. א. 69.91°
ב. 0.029N
ג. $\tan\alpha = \frac{BIL}{mg}$
22. 3.93cm
23. $2.84\cdot10^{-5}T$ בזווית 45°
24. $1.85\cdot10^{-2}A$
25. $\frac{4.5R}{\pi}$
26. 3.82cm
27. ב. 0.126A
28. א. 2.57A
ב. $2000m^{-1}$
ג. $6.46\cdot10^{-3}T$
30. א. נגד כיוון מחוגי השעון
ב. $6.63\cdot10^{-2}A$

השראה אלקטרומגנטית

בפרק זה נעסוק ביצירת מתחים וזרמים במוליכים ללא נוכחות סוללה חשמלית המבוססת על שינויים כימיים. כא"מ שנוצר בהשפעת מגנט על מוליכים נקרא כא"מ מושרה, וככל כא"מ, הוא עשוי ליצור זרם במעגל חשמלי סגור. למעשה, נסקור את העבודה המדעית המפוארת של M. Faraday שנעשתה באנגליה במחצית הראשונה של המאה ה- 19. באופן בלתי תלוי, תחום זה נחקר גם על ידי J. Henry בארה"ב, ואף הוא תרם תרומה חשובה לחקירת חוקי האלקטרומגנטיות.

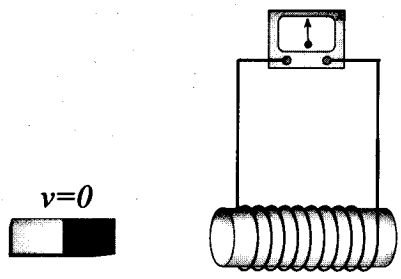
נעסוק באופן מפורט בחוק פארדיי, שמקשר בין כא"מ מושרה לבין שינוי השטף המגנטי דרך מעגל סגור, ובהמשך נעסוק בחוק לנץ שמאפשר לקבוע את כיוון הזרם המושרה. זהו פרק גדוש יישומים ששינו את פני העולם - הגנראטור והשנאי.



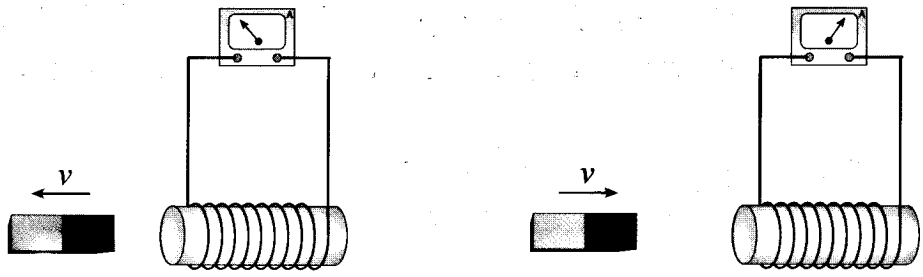
איור 1: עקרון פעולתו של הגנראטור-מוט מגנטי נע ביחס לסליל.

9.1 השראה אלקטרומגנטית - הצגת התופעה

באיורים 2 ו-3 מתוארת התנועה של מגנט מוט יחסית לסליל נייח העשוי מחומר מוליך. לסליל מחובר אמפרמטר בלבד, כך שיצירת הזרם במעגל, בכל אחד מהמקרים היא תוצאה של תנועת המגנט יחסית לסליל.



איור 2: מגנט וסליל נייחים. אין זרם במעגל הסליל.



איור 3: כאשר המגנט נע, נוצר זרם מושרה במעגל הסליל. כיוון הזרם תלוי בכיוון תנועת המגנט.

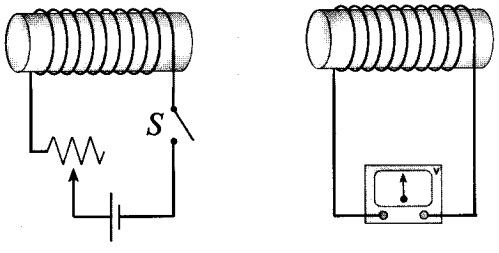
מהתבוננות בניסויים הפשוטים שתוארו באיורים אלה, ניתן ללמוד את הדברים הבאים:

* במעגל הסליל נוצר זרם חשמלי כאשר קיימת תנועה יחסית בין המגנט לסליל.
* אין זרם כאשר המגנט והסליל נמצאים במנוחה זה ביחס לזה.
* אם הופכים את כיוון התנועה של המגנט - מתהפכת מגמת הזרם.
* הזרם המושרה בסליל גדל אם:
  1. המגנט "חזק" יותר.
  2. מגדילים את מספר הליפופים בסליל.
  3. המהירות היחסית של תנועת המגנט ביחס לסליל גדולה יותר.
* כאשר מקרבים את המגנט לסליל, הסליל נדחף וזו עדות לכך שבמקרה זה פועלים בין המגנט לסליל כוחות דחייה. כאשר מרחיקים את המגנט, הסליל נמשך למגנט. בכל מקרה, הסליל והמגנט מפעילים זה על זה כוחות "שינסו לעכב" את תנועתם היחסית.

כדי להבין כיצד נוצרו הזרמים במערכת המוצגת באיור 3, ננסה להבין תחילה כיצד נוצר הכא"מ המושרה שחולל את הזרמים. כא"מ זה, אותו נכנה בהמשך "כא"מ מושרה", נוצר כתוצאה

מתנועת המגנט. לשם הבנת הנושא, נתאר ניסוי בו נוצר כא"מ מושרה במוליך ללא שימוש במגנט קבוע. הניסוי וחקירת המסקנות הנובעות ממנו בוצעו על ידי פארדיי בתחילת המאה ה-19. מערכת הניסוי כוללת שני סלילים. אל הסליל האחד, הימני באיור, מחובר אמפרמטר. הסליל השני מוצב מול הראשון, ומחברים אליו סוללה, נגד משתנה ומתג. נדגיש: בין שני הסלילים אין קשר מוליך, הם מנותקים לחלוטין זה מזה.

בכל פעם שהאמפרמטר מורה על זרם שונה מאפס, ניתן להסיק שזורם זרם דרך מעגל הסליל הימני, דבר המעיד על היווצרות כא"מ מושרה בסליל זה. בהמשך נתאר מספר מקרים שבהם כך הם פני הדברים.



איור 4: בסליל הימני נוצר כא"מ מושרה בכל עת שיש שינוי בעוצמת הזרם בסליל השמאלי

1. כאשר סוגרים את המתג S, נוצר כא"מ מושרה בסליל הימני למשך זמן קצר, ומד המתח סוטה ממצבו לזמן קצר.
2. כא"מ זה מתאפס אחרי זמן קצר, למרות שבסליל השמאלי ממשיך לזרום זרם.
3. במקרה אחר, בעת הגדלת הזרם בסליל השמאלי, נוצר כא"מ מושרה בסליל הימני. בעת הקטנת הזרם בסליל השמאלי, על ידי הגדלת ערכו של הנגד המשתנה, נוצר כא"מ מושרה בסליל הימני, כל עוד משתנה ערך הזרם בסליל השמאלי, אך הפעם במגמה מנוגדת.
4. כאשר פותחים את המתג, נוצר, לזמן קצר, מתח הפוך למתח שתואר בסעיף מספר 1. מתח זה מתאפס כעבור זמן קצר.

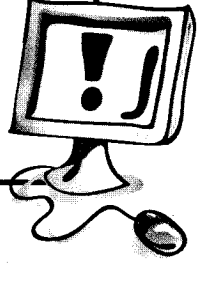
ננסה להבין מה דומה ומה שונה בשתי המערכות בהן נוצר זרם מושרה – כזכור, מערכת אחת כללה סליל יחיד ומגנט, ומערכת שנייה כללה זוג סלילים.

ראה הדגמה:

Faraday's Magnetic Field Induction Experiment

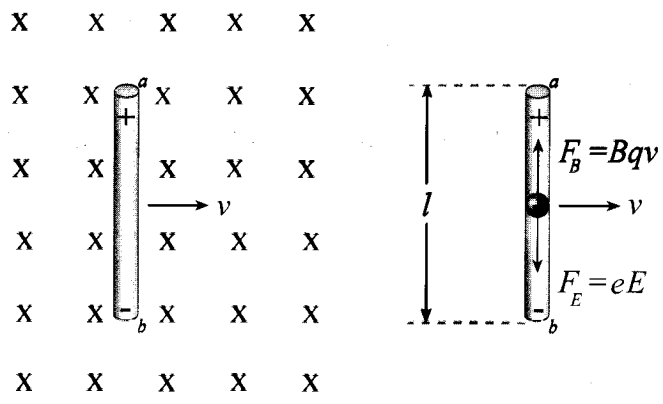
http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday/index.html

באתר מתוארת המערכת באמצעותה חקר פארדיי את ההשראה האלקטרומגנטית.



9.2 יצירת כא"מ משרה בגוף הנע בשדה מגנטי אחיד

כאשר מוט מוליך ניטרלי נע בשדה מגנטי, נוצר בין קצותיו כא"מ משרה.



איור 5: הכוחות הפועלים על מטען חיובי במוט בזמן שהוא נע בשדה מגנטי.
כיוון הכוח המגנטי הפועל על אלקטרון חופשי במוט הוא בכיוון מטה, לכן
נוצר קיטוב במוט באופן שחלקו התחתון שלילי. l מציין את אורך המוט.

המוט באיור 5 נע ימינה במהירות קבועה v, בשדה מגנטי אחיד B, שכיוונו לתוך הדף. באיור הימני מתוארים הכוחות הפועלים על מטען חיובי במוט. על כל אלקטרון הנמצא בתוך המוט פועל כוח מגנטי כלפי מטה שגודלו קבוע $F_B = Bev$. כוח זה גורם לכך שהאלקטרונים החופשיים נעים אל הקצה b של המוט כך שבמוט נוצר קיטוב. הפרדת מטענים זו יוצרת שדה חשמלי שעוצמתו E הולכת וגדלה, וכיוונו אל הקצה השלילי b. כתוצאה מכך, על כל אלקטרון במוט פועל בנוסף לכוח המגנטי F_B - גם כוח חשמלי בכיוון מנוגד ל-F_B, שגודלו $F_E = E \cdot e$ הולך וגדל. תהליך הפרדת המטענים במוט נפסק כאשר הכוח המגנטי הפועל על המטענים במוט משתווה לכוח החשמלי:

$$F_B = F_E$$

כלומר:

$$Bev = Ee$$

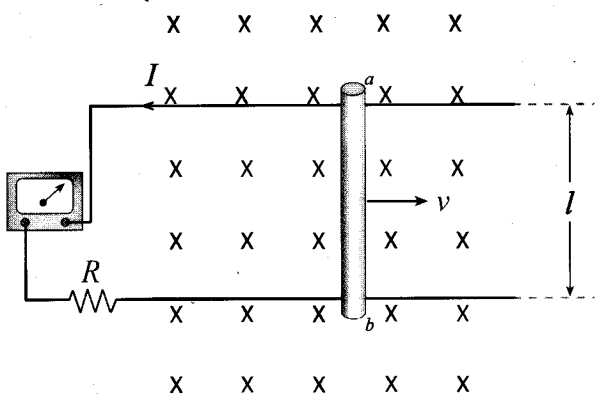
את עוצמת השדה החשמלי ניתן לבטא באמצעות הפרש הפוטנציאלים במוט, V_{ab}, ואורך המוט l, לכן מתקיים:

$$Bev = \frac{V_{ab}}{l} e$$

כלומר, בסיום הפרדת המטענים, המתח בין קצות המוט הוא $V_{ab} = Blv$. מתח זה הוא הכא"מ המושרה בין קצות המוט:

$$\varepsilon = Blv$$

כדי שייווצר זרם חשמלי לאורך זמן, יש צורך ליצור מעגל חשמלי סגור. אם מחברים מוליכים בין קצות המוט, נוצר המעגל החשמלי הבא:

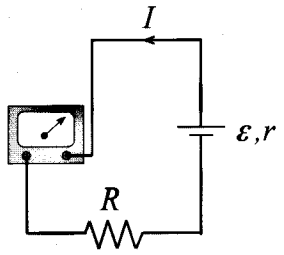


איור 6: כשהמוט נע ימינה, במעגל החשמלי נוצר זרם מושרה נגד כיוון השעון.

כיוון הזרם הוא כמתואר באיור, ובתוך המוט הוא כלפי מעלה. עוצמת הזרם היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_T} = \frac{Blv}{R_T}$$

מעגל חשמלי זה שקול למעגל באיור 7, המכיל סוללה במקום המוט הנע בתוך שדה מגנטי:



איור 7: המעגל החשמלי השקול למעגל באיור 6

במקרה שלמוט יש התנגדות פנימית r, הביטוי לעוצמת הזרם במעגל הוא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{Blv}{R+r}$$

ראוי להדגיש שמהירות המוט מאונכת לשדה המגנטי בדוגמה זו. אם וקטור השדה המגנטי מקביל לווקטור המהירות, לא נוצר כא"מ במוט. בכל מקרה, יש להתייחס רק לרכיב הניצב לווקטור המהירות של עוצמת השדה המגנטי B כי הרכיב של $\vec{B}$ המקביל למהירות אינו יוצר כא"מ מושרה.

דוגמה 1

חשב את הכא"מ ואת הזרם במערכת שתוארה באיור 6, אם $B = 0.1T$, $v = 10m/s$, $l = 0.2m$ ו $R = 20\Omega$. ההתנגדויות של המוט, של התיילים ושל מכשיר המדידה זניחות.

פתרון:

$$\varepsilon = Blv = 0.1 \cdot 0.2 \cdot 10 = 0.2\ Volt$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0.2V}{20\Omega} = 0.01A$$

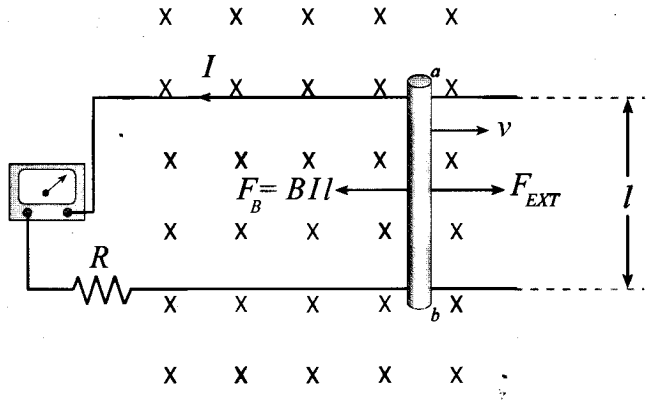
להשלמת התמונה, נציג שתי שאלות:

א. בעת תנועת המוט שדרכו זורם זרם, השדה המגנטי מפעיל עליו כוח מגנטי שמאלה, בגודל $F_B = BIl$. כיצד, אם כן, נע המוט ימינה במהירות קבועה?

ב. אם במעגל נוצר זרם כתוצאה מתנועת המוט, מתפתחת בנגד אנרגיה פנימית שגורמת להתחממותו. מה מקורה של אנרגיה זו?

למעשה, שתי השאלות כרוכות זו בזו:

כדי שהמוט ינוע ימינה במהירות קבועה, יש צורך להפעיל עליו כוח חיצוני F_{EXT} השווה בגודלו לכוח המגנטי שפועל על המוט, $F_{EXT} = F_B$. רק במצב זה מתקיים $\Sigma F = 0$, התנאי לתנועה קצובה של המוט.



איור 8: הכוחות הפועלים על המוט בעת תנועתו במהירות קצובה

הכוח החיצוני מקיים:

$$F_{EXT} = F_B = BIl = B\frac{Bvl}{R_T}l = \frac{B^2vl^2}{R_T}$$

הגורם החיצוני המפעיל את הכוח הוא מקור האנרגיה במעגל. העבודה המתבצעת על ידי הכוח החיצוני הופכת לאנרגיה חשמלית במעגל, ההופכת בתורה לאנרגיה פנימית בנגד, שמתבטאת בהתחממותו. לפי חוק שימור האנרגיה מתקיים:

$$F_{EXT}\cdot\Delta x = I^2R\Delta t \quad ;\ \Delta x \text{ הוא העתק של המוט.}$$

אם נחלק משוואה זו בפרק הזמן Δt שבו התהליך מתרחש, נקבל את הביטוי:

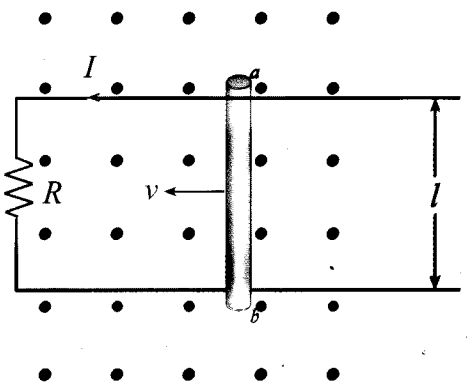
$$\frac{F_{EXT}\cdot\Delta x}{\Delta t} = I^2R$$

או:

$$F_{EXT}\cdot v = I^2R$$

כלומר ההספק המכני של הכוח החיצוני שווה להספק החום בנגד.

דוגמה 2:



איור 9-א: המוט נע שמאלה ובמעגל נוצר זרם מושרה

המוט באיור נע שמאלה במהירות קבועה בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.01T וכיוונו "אל הקורא", ויוצר זרם קבוע של 1mA בנגד $R = 2\Omega$. המרחק בין נקודות המגע של המוט עם הסוללה $l = 0.5\text{m}$. התנגדויות המסילה והמוט זניחות.

דוגמה 2 - המשך:

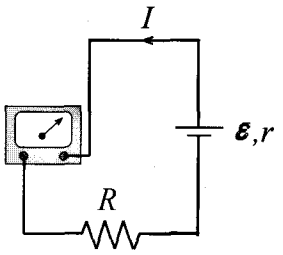
א. מהו כיוון הזרם במוט?

ב. מהי מהירות המוט?

ג. מה גודלו של הכוח הדוחף את המוט שמאלה?

פתרון:

א. הכוח המגנטי שפועל על מטען חיובי במוט הוא כלפי מעלה. המטען השלילי שבמוט נע לעבר קצה b של המוט, ובמוט נוצר קיטוב. הכא"מ במעגל שקול לכא"מ שנוצר בסוללה המחוברת בכיוון המתואר באיור 9-ב':
מגמת הזרם במעגל היא נגד כיוון מחוגי השעון,
ובמוט כיוון הזרם כלפי מעלה.



ב. בהנחה שהמוט חסר התנגדות כלומר $r = 0$,

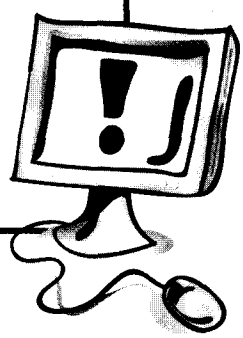
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{Bvl}{R} \Rightarrow v = \frac{I \cdot R}{B \cdot l}$$

$$v = \frac{10^{-3}}{10^{-2} \cdot 0.5} = 0.4 m/s$$

ג. גודלו של הכוח החיצוני שדוחף את המוט שמאלה ניתן לחישוב על פי:

$$F_{EXT} = BIl = 10^{-2} \cdot 10^{-3} \cdot 0.4 = 4 \cdot 10^{-6} N$$

ראה הדגמה:

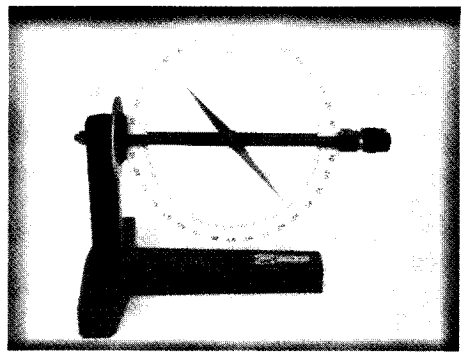


http://www.ngsir.netfirms.com/englishhtm/Induction.htm

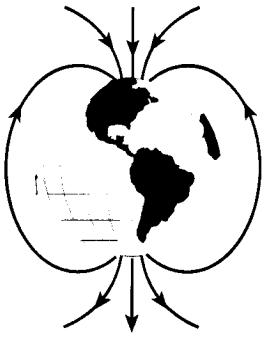
ההדמיה מדגימה את כיוון הזרם המושרה ואת הכוח החיצוני הדרוש כדי שמוט ינוע בשדה מגנטי.

תרגיל אתגר:

מטוס מגיע ארצה מכיוון הים, בטיסה אופקית מזרחה, בדרך לנחיתה בנמל התעופה בן גוריון. בטיסה כזו נוצר מתח מושרה בין קצות כנפיו, בהשפעת השדה המגנטי של הארץ. מצפון לקו המשווה, וקטור השדה המגנטי הארצי פונה בכיוון ביניים בין כיוון צפון לכיוון הארץ. (ראה איור 10-מצפן רכינה)[1]:



איור 10: מצפן רכינה

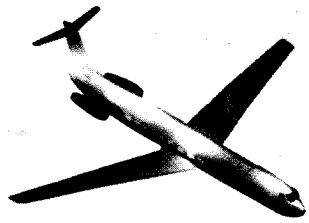


איור 11: תרשים השדה המגנטי הארצי

היות שמהירות המטוס היא אופקית, רק הרכיב האנכי של השדה המגנטי הארצי, הפונה כלפי מטה, גורם לכא"מ מושרה בין קצות הכנפיים.

א. באיזו כנף מתרכזים המטענים החיוביים, ובאיזו כנף מתרכזים המטענים השליליים?

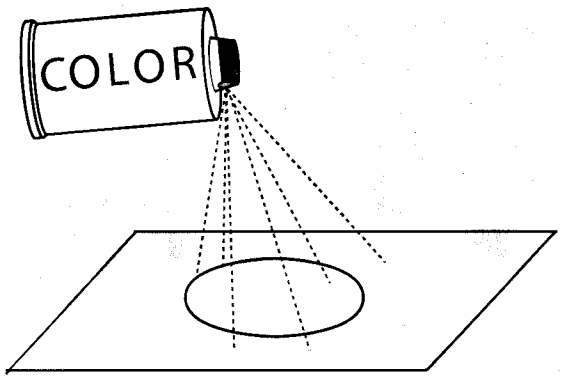
ב. אם המרחק בין קצות הכנפיים הוא 20m, ומהירות המטוס היא 300km/h, מהו גודל הכא"מ המושרה בין קצות הכנפיים?



[1] מצפן רכינה חופשי להסתובב סביב ציר אופקי, בניגוד למצפן רגיל שצירו אנכי.

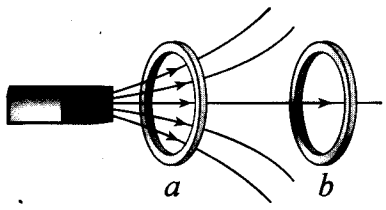
9.3 חוק פארדיי

להכללת התופעות שתיארנו עד כה, עלינו להגדיר קשר חדש שנסביר בהמשכו של סעיף זה. נתאר כאן את המושג "שטף מגנטי" ואת משמעותו. מושג השטף מוכר לנו מלימוד השטף של השדה החשמלי ובפרט מחוק גאוס. לתזכורת, נתאר תחילה דוגמה מוחשית מתחום הזורמים:
תרסיס צבע מתפזר ממיכל לחץ בקצב קבוע. נניח שהמיכל פולט 1000 טיפות צבע זעירות בכל שנייה.



איור 12: שטף טיפות הצבע דרך העיגול יגדל אם נקרב אליו את מיכל הצבע

כדי לצבוע מהר וביעילות משטח של חפץ עגול (איור 12), טוב נעשה אם נקרב את פיית המיכל אל החפץ. באופן זה נגדיל את "שטף טיפות הצבע" שפוגעות בו. כמובן, אפשר גם להשתמש במיכל שפולט 2000 טיפות בשנייה, ועבודת הצביעה תתייעל. עד כאן המשל, והנמשל:
באיור 13 מתוארים קווי השדה של מוט מגנטי. צפיפותם של קווי השדה, כלומר מספר הקווים ליחידת שטח הניצבת לקווי השדה, היא מדד לעוצמת השדה המגנטי. סמוך למגנט, צפיפות הקווים גדולה, וככל שמתרחקים ממנו צפיפותם קטנה.



איור 13: יחס השטף של קווי השדה המגנטי בשתי הטבעות באיור הוא 5:1

שטחי הטבעות באיור שווים, לכן השטף המגנטי דרך טבעת a גדול פי חמישה מהשטף המגנטי דרך טבעת b.

השטף המגנטי מסומן Φ, ומוגדר על ידי הקשר:

$$\Phi = BA$$

כאשר B הוא עוצמת השדה המגנטי, ו- A הוא השטח שדרכו עוברים קווי השדה כאשר הוא

מאונך להם.

יחידת השטף המגנטי בשיטת SI היא "וובר" המוגדרת בקשר הבא:

$$[\Phi] = [B] \cdot [A] = T \cdot m^2 = Wb$$

במחקריו, פארדיי מצא הכללה חשובה, המפרטת את התנאים בהם נוצר כא"מ מושרה.

הגדרה:

חוק פארדיי:

הכא"מ המושרה שנוצר במעגל חשמלי סגור פרופורציוני לקצב שינוי השטף המגנטי דרך המעגל.

בכתיבה מתמטית:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

כלומר, ערך הכא"מ המושרה **הרגעי** (או המתח המושרה **הרגעי**) הוא נגזרת השטף המגנטי לפי הזמן.

הכא"מ המושרה **הממוצע** , ε_{ave} , ניתן לחישוב על ידי:

$$\varepsilon_{ave} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

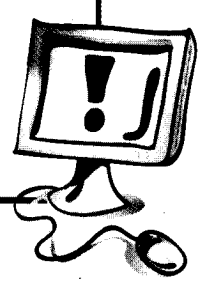
על משמעותו של הסימן האלגברי השלילי בשני הביטויים האחרונים נדון בהמשך הפרק.

ראה הדגמה:

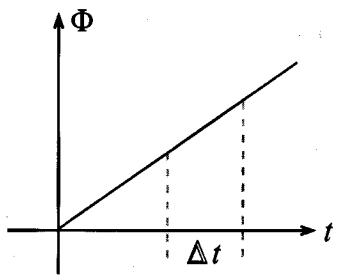
Faraday's Magnetic Field Induction Experiment

http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday2/index.html

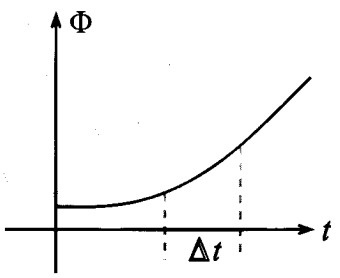
שים לב, בסליל נוצר כא"מ מושרה כל עוד קיימת תנועה יחסית בין הסליל למגנט.



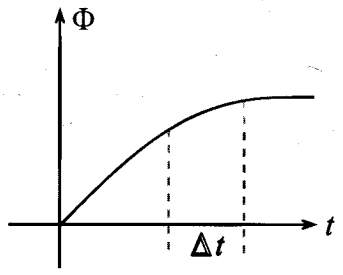
נדגים בגרפים הבאים את השתנות השטף המגנטי כפונקציה של הזמן ואת השלכותיו לגבי הכא"מ המושרה:



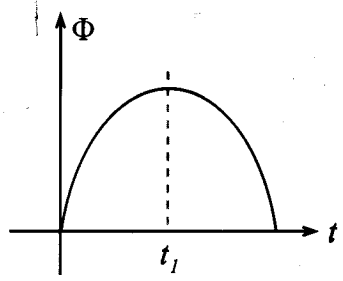
איור 14: הכא"מ ε קבוע בפרק הזמן Δt.



איור 15: הכא"מ ε הולך וגדל בפרק הזמן Δt.



איור 16: הכא"מ ε הולך וקטן בפרק הזמן Δt.



איור 17: הכא"מ $\varepsilon(t_1) = 0$

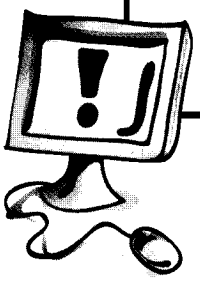
הדרכים בהן אפשר לשנות שטף מגנטי דרך כריכה הן:

- לשנות את שטח הכריכה A ולשמור את עוצמת השדה המגנטי קבועה.
- לשנות את עוצמת השדה המגנטי B ולשמור את שטח הכריכה קבוע.
- להטות את הכריכה ביחס לכיוון השדה המגנטי.
- לצרף שתיים או יותר מהאפשרויות הרשומות למעלה. למשל: אפשר לשנות את עוצמת השדה המגנטי B, ובו בזמן גם את שטח הכריכה המוליכה A.

ראה הדגמייה:

http://www.ee.surrey.ac.uk/Teaching/Courses/EFT/dynamics/html/magnetic_flux.html

בהדמיה ניתן לשנות את הזווית ולראות את השטף המגנטי כפונקציה של הזווית.

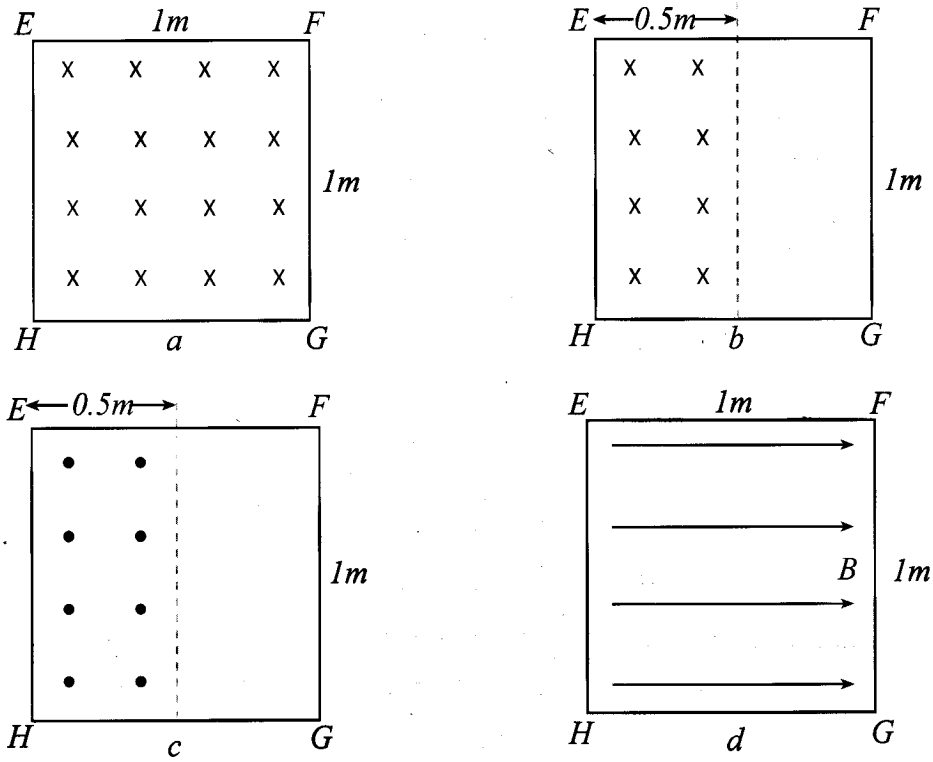


בדוגמה הבאה נראה את אופן החישוב של השטף המגנטי Φ.

דוגמה 3

באיורים הבאים מתוארת כריכה ריבועית ושדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.5T.

חשב את השטף המגנטי Φ דרך הכריכה בכל אחד מהמקרים a, b, c, d.



איור 18: השטף המגנטי בכריכה ריבועית EFGH במקרים שונים

פתרון:

נשתמש בביטוי $\Phi = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{A}$, שבו A מייצג את גודל השטח הנמצא בשדה המגנטי. כדי להבדיל בין שני הכיוונים האפשריים של הווקטור $\vec{\boldsymbol{B}}$, יש לייחס לשטף גם סימן (+) או (-).

א. $\Phi_a = (0.5T)\cdot(1m^2) = 0.5\ Wb$

ב. $\Phi_b = (0.5T)\cdot(1m\cdot 0.5\ m) = 0.25Wb$

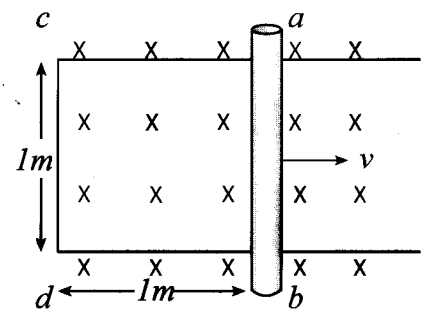
בדוגמה הבאה כיוון וקטור השדה המגנטי הפוך ביחס לכיוונו בשתי הדוגמאות הקודמות, לכן סימנו האלגברי של השטף שלילי.

ג. $\Phi_c = (-0.5T)\cdot(1m\cdot 0.5\ m) = -0.25Wb$

ד. $\Phi_d = BA = 0$; במקרה זה אין כלל קווי שדה ה"שוטפים" את שטח הכריכה.

דוגמה 4:

מוט ab נע ימינה על מסילה במהירות $v = 2m/s$. בתחילה היה המוט במרחק $x_0 = 1m$ מהצלע cd. השדה אחיד, וגודל עוצמתו $B = 0.1T$. המרחק בין פסי המסילה הוא $l = 1m$.



איור 19 : מוט נע בשדה מגנטי אחיד

א. חשב את השטף המגנטי דרך השטח abcd (המסומן S_0) בזמן $t_0 = 0$.

ב. חשב את השטף המגנטי בזמן $t = 6s$.

ג. חשב את קצב שינוי השטף בדוגמה זו.

<u>פתרון:</u>

א. בזמן $t = 0$: $\Phi_0 = BS_0 = (0.1T)(1m)^2 = 0.1Wb$

ב. $\Phi_t = BS = B\cdot[l\cdot(x_0+vt)] = (0.1T)[1\cdot(1+2\cdot6)] = 1.3\ Wb$

ג. כדי להשיב כראוי על סעיף ג' של שאלה זו עלינו לבטא תחילה את השטף המגנטי כפונקציה של הזמן. הנגזרת של פונקציה זו מבטאת את קצב שינוי השטף:

$$\Phi(t) = BS_t = Bl(x_0 + vt)$$

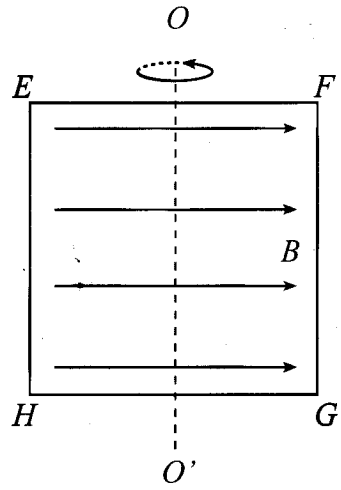
$$\frac{d\Phi}{dt} = \Phi' = Blv$$

הערה: קצב שינוי השטף במקרה זה קבוע, והוא אינו משתנה כפונקציה של הזמן.

דוגמה 5

מסגרת ריבועית EFGH מסתובבת סביב ציר OO' בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו $B = 0.5T$. זמן המחזור של הסיבוב הוא 0.4 שניות; אורך צלע המסגרת הוא $a = 0.2m$.

האיור מתאר את המצב בזמן $t = 0$.



איור 20: הכריכה EFGH מסתובבת בשדה מגנטי אחיד

א. מה ערך השטף המגנטי דרך הכריכה בזמן $t = 0$?

ב. חשב את השטף המגנטי כעבור 0.1s מתחילת הסיבוב.

ג. חשב את הקצב הממוצע של שינוי השטף במשך 0.1s הראשונות.

ד. חשב את הקצב הרגעי של שינוי השטף בזמן $t = 0.1s$.

<u>פתרון:</u>

א. מישור הכריכה מקביל לקווי השדה, לכן השטף המגנטי דרכה הוא 0.

ב. אחרי רבע זמן מחזור הכריכה ניצבת לקווי השדה, לכן:

$$\Phi = BS = 0.5T\ (0.2m \cdot 0.2m) = 0.02Wb$$

ג. $$\Delta\Phi/\Delta t = (\Phi_f - \Phi_i) / \Delta t = 0.02Wb / 0.1s = 0.2Wb/s = 0.2T$$

כלומר השטף המגנטי גדל בממוצע ב - 0.2Weber בכל שנייה.

ד. כדי לחשב את הקצב הרגעי של השינוי בשטף, נבטא תחילה את פונקציית השטף כתלות בזמן:

$$\Phi(t) = (BS)[\cos(2\pi/T)t] = 0.02\cos(2\pi/0.4)t = 0.02\cos(5\pi t)$$

דוגמה 5 - המשך:

עתה נגזור את פונקציית השטף לפי הזמן ונקבל:

$$\Phi'(t) = d\Phi(t)/dt = -(5\pi)\cdot(0.02)\sin(5\pi t)$$

נציב $t = 0.1s$:

$$\Phi'(0.5s) = -0.1\pi \sin(0.5\pi) = -0.1\cdot\pi \text{ Wb/s} = 0.1\cdot\pi \text{ T}$$

הקצב הרגעי של שינוי השטף הרגעי גדול מהממוצע במקרה זה. דבר זה אינו מפתיע אם ניקח בחשבון שפונקציית השטף המגנטי כתלות בזמן אינה לינארית במקרה המתואר.
כאמור, קצב שינוי השטף הרגעי הוא ערך נגזרת השטף לפי הזמן. ערך זה הוא גם ערכו של הכא"מ המושרה הרגעי. ידיעת ערכו של הכא"מ מאפשרת לחשב את ערך הזרם המושרה מתוך הנוסחה $I = \frac{\varepsilon}{R_T}$.

נדון עתה בקביעת כיוונו של הזרם המושרה.

9.4 חוק לנץ (H. Lenz)

את כיוון הזרם המושרה בכריכה מוליכה ניתן למצוא בעזרת חוק לנץ. חוק לנץ קובע:
כיוון הזרם המושרה בכריכה הוא כך שהוא יוצר שטף מגנטי דרך הכריכה המתנגד לשינוי השטף המגנטי שגרם להיווצרותו.
זה עלול להיות מסורבל מעט. קרוב לוודאי שהקושי טמון בצורך לבצע שרשרת שיקולים, זה אחר זה, כדי לקבוע את כיוון הזרם המושרה.
נפרט:

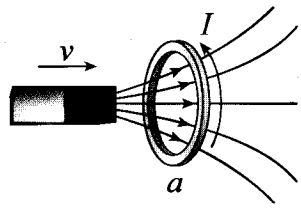
- **שינוי בשטף המגנטי** דרך הכריכה יוצר כא"מ מושרה.
- הכא"מ המושרה יוצר זרם מושרה.
- זרם זה יוצר בעצמו **שטף מגנטי מושרה**.
- **השטף המגנטי המושרה מתנגד לשינוי בשטף המגנטי** אשר גרם להיווצרות הזרם המושרה.

זהירות, מכשלה !

זרם מושרה אינו תולדה של שטף מגנטי. הוא תולדה של **שינוי**, כן, **שינוי** בשטף המגנטי.

נדגים זאת בכמה דוגמאות:

א. מקרבים קוטב צפוני של מגנט אל טבעת מוליכה-ראה איור 21.



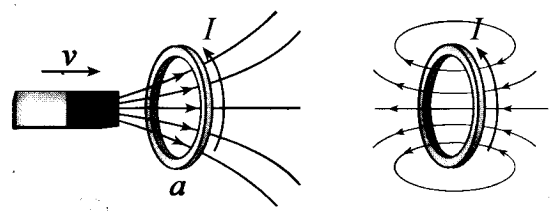
איור 21: קירוב קוטב צפוני לטבעת יוצר זרם מושרה בכיוון המסומן באיור

ב. פעולה זו <u>מגדילה את השטף המגנטי</u> של קווי השדה דרך הטבעת. בטבעת נוצר כא"מ מושרה, בהתאם לחוק פארדיי.

ג. הכא"מ גורם להיווצרות זרם מושרה בטבעת. זרם זה יוצר בעצמו שדה מגנטי.

ד. כיוון הזרם המושרה הוא כזה <u>שמתנגד להגדלת השטף המגנטי בטבעת</u>, כלומר הזרם מייצר שדה מגנטי שדוחה את המגנט המתקרב לטבעת - ראה איור 22.

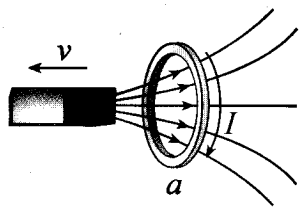
התוצאה המעשית: "צריך להתאמץ" כדי לקרב את המגנט אל הטבעת; המגנט נדחה על ידי הטבעת.



איור 22: השדה הנוצר על ידי הזרם המושרה, כפי שמפורט בתרשים הימני של הטבעת, דוחה את המגנט המתקרב.

דוגמה הפוכה:

מרחיקים קוטב צפוני של מגנט מטבעת מוליכה - ראה איור 23. נברר את כיוון הזרם המושרה בטבעת.



איור 23: הרחקת קוטב צפוני מהטבעת יוצרת זרם מושרה בכיוון המסומן בטבעת.

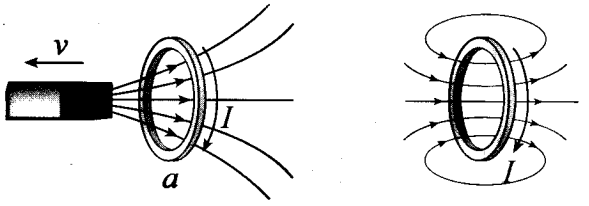
א. **מרחיקים את הקוטב הצפוני מהטבעת המוליכה. נברר את כיוון הזרם המושרה בטבעת.**

ב. פעולה זו מקטינה את השטף המגנטי של קווי השדה דרך הטבעת.

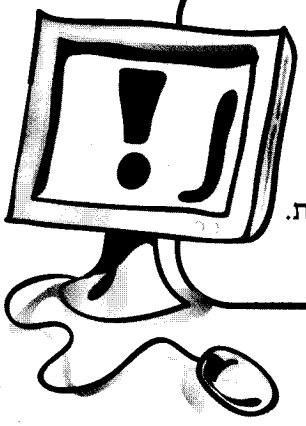
ג. **בטבעת נוצר זרם מושרה, בהתאם לחוק פארדיי. זרם זה יוצר שדה מגנטי.**

ד. כיוון הזרם המושרה הוא כזה שמתנגד להקטנת השטף המגנטי כלומר, הזרם מייצר שדה בכיוון השדה המגנטי של המגנט המתרחק - ראה איור 24.

התוצאה המעשית: "קשה" להרחיק את המגנט מהטבעת; המגנט נמשך על ידי הטבעת.



איור 24: השדה הנוצר על ידי הזרם המושרה בטבעת הימנית מושך אליו את המגנט המתרחק.



ראה הדגמה:

חוק לנץ "Lenz's Law"

http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/lenzlaw/index.html

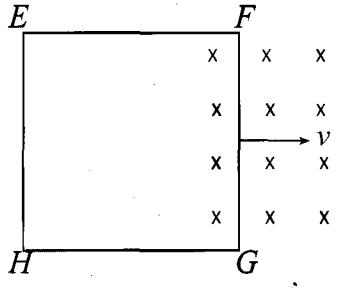
בהדמיה ניתן לשנות את הזווית ולראות את השטף המגנטי כפונקציה של הזווית.

חוק לנץ כביטוי לחוק שימור האנרגיה:

צירוף שתי הדוגמאות האחרונות מדגים את חוק שימור האנרגיה. בכל אחד מהמקרים, נוצר זרם מושרה בטבעת המוליכה. בהנחה שלטבעת יש התנגדות אוהמית, צפוי להתפתח בה חום בעת תנועת המגנט. המאמץ הדרוש לקירוב המגנט אל הטבעת ולהרחקתו הוא "התשלום" האנרגטי שמשלם האדם, או הגוף שמניע את המגנט, עבור התחממות הטבעת. הכוח החיצוני המקרב או המרחיק את המגנט, מבצע עבודה המאפשרת את הזרם במוליך. אילו כיוון הזרם המושרה היה בניגוד לכיוון שחוק לנץ קובע, הזרם היה מושך את המגנט. האנרגיה הקינטית של המגנט הייתה הולכת וגדלה, ללא השקעת אנרגיה, בסתירה לחוק שימור האנרגיה. (היה נוצר חום בנגד, בד בבד עם האצת המגנט על ידי הזרם המושרה. הכוח החיצוני יכול לחדול מלפעול, וכך הייתה נוצרת אנרגיה פנימית ללא צורך בביצוע עבודה).

דוגמה 9 - א:

באיור 25 כריכה מלבנית מוליכה EFGH נעה ימינה לתוך שדה מגנטי אחיד מופנה לתוך הדף.
מצא באמצעות חוק לנץ מהו כיוון הזרם המושרה בכריכה.



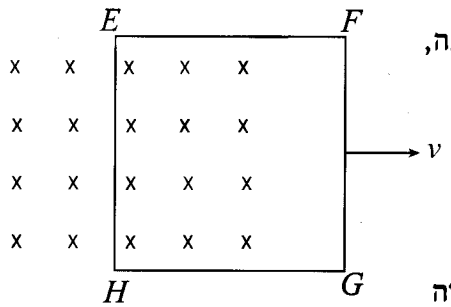
איור 25: הכריכה נכנסת לשדה אחיד.

פתרון:

השטף דרך הכריכה גדל, מספר קווי השדה (ה-"x"-ים) בתוכה גדל. נוצר זרם מושרה היוצר שדה מגנטי שיוצא מהדף ("נקודות") באופן שמתנגד להגדלת השטף המגנטי. כיוונו של הזרם המושרה שיוצר "נקודות בכריכה" הוא מ-F ל-E , כלומר בניגוד לכיוון מחוגי השעון.

דוגמה 6 - ב:

באיור 26 הכריכה שהוזכרה בדוגמה 6-א נעה ימינה, ועוזבת את אזור השדה המגנטי.
מהו כיוון הזרם המושרה בכריכה?

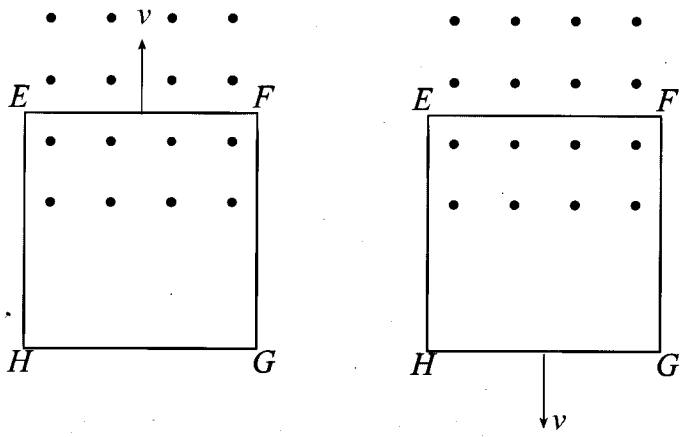


איור 26: הכריכה יוצאת מתוך שדה אחיד.

פתרון:
השטף המגנטי בכריכה קטן. נוצר זרם מושרה שנוטה להשלים את ה-"x"-ים שמתמעטים בכריכה. לפיכך כיוון הזרם המושרה הוא מ-E ל-F, כלומר בכיוון מחוגי השעון.

בדוק עצמך!

מצא את כיוון הזרם המושרה בצלע EF בדוגמאות הבאות:



איור 27: מה כיוון הזרם המושרה בכריכות?

תשובות:
מ-F ל-E באיור הימני.
מ-E ל-F באיור השמאלי.

דוגמה 7:

אורך הצלע של כריכה ריבועית מוליכה EFGH הוא a. הכריכה נעה במהירות קבועה v לקראת שדה מגנטי אחיד B. הכריכה נכנסת לשדה תוך פרק זמן T, נעה כולה בשדה במשך זמן 2T, ויוצאת מהשדה במשך זמן T. הזמן הכולל של תנועתה הוא 4T. התנגדות הכריכה היא R.

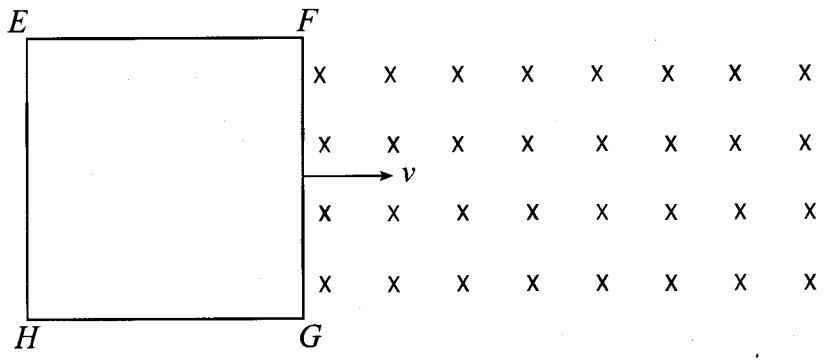
א. תאר את כיוון הזרם בכריכה בכל אחד משלושת שלבי התנועה.

ב. מהו ערך הכא"מ המושרה בכריכה?

ג. מהו גודלו ומהו כיוונו של הכוח החיצוני F_{EXT} שמקיים את התנועה?

פתרון:

<u>בפרק הזמן $0 < t < T$</u>, כאשר הצלע הימנית נכנסת לשדה (איור 28):



איור 28: הכריכה מתחילה להיכנס לשדה המגנטי.

השטף המגנטי דרך הכריכה גדל, לכן, על פי חוק לנץ, נוצר בה זרם מושרה מ-G ל-F כלומר, בכיוון סיבוב מחוגי השעון.

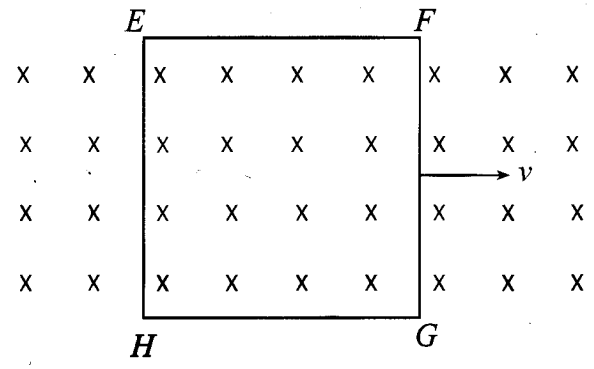
ערך הכא"מ המושרה הוא $\varepsilon = Bav$ והוא קבוע.

הכוח החיצוני פועל ימינה וערכו:

$$F_{EXT} = BIL = \frac{B^2 a^2 v}{R}$$

דוגמה 7 - המשך:

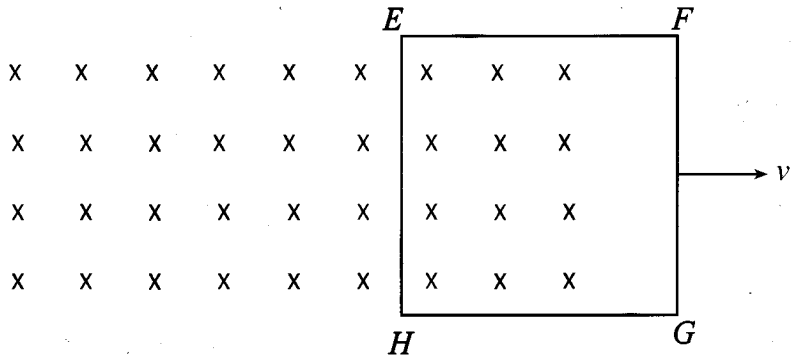
<u>בפרק הזמן $T < t < 3T$</u>, כאשר כל הכריכה נמצאת בשדה (איור 29):



איור 29: הכריכה נעה כולה בשדה האחיד. במקרה זה אין שינוי בשטף המגנטי דרכה.

אין שינוי בשטף, לכן לא נוצר זרם מושרה בכריכה. הכוח המגנטי והחיצוני מתאפסים.
המצב דומה לתנועת גוף על משטח חלק במהירות קבועה.

<u>בפרק הזמן $3T < t < 4T$</u>, כאשר הצלע הימנית כבר מחוץ לשדה (איור 30):

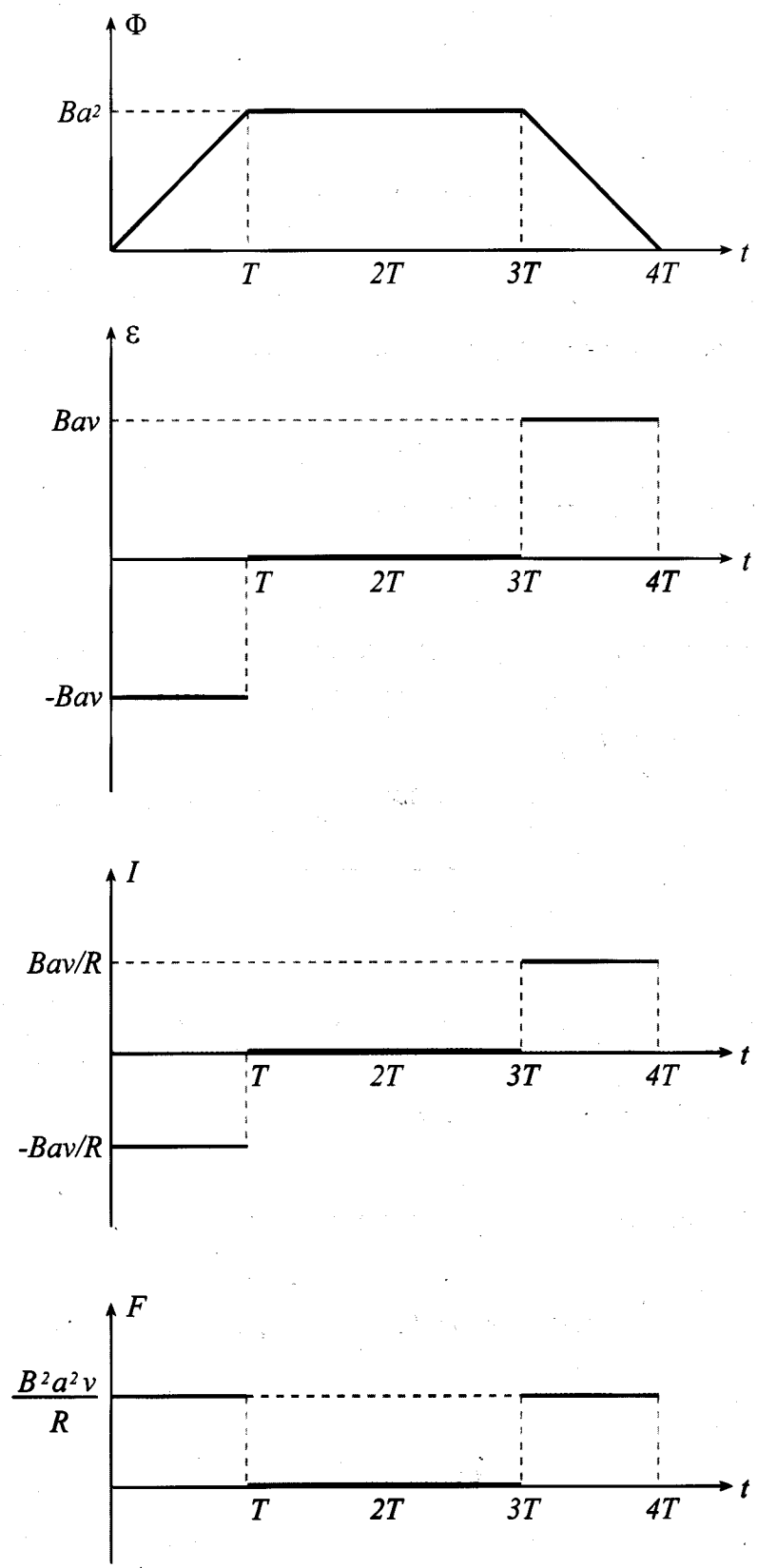


איור 30: השטף דרך הכריכה קטן, לכן נוצר בה זרם מושרה

השטף המגנטי קטן, לכן, נוצר זרם מושרה מ-F ל-G, כלומר במגמת מחוגי השעון.
ערך הכא"מ המושרה הוא $\varepsilon = Bav$, והוא קבוע.
הכוח החיצוני שמקיים את התנועה במהירות קבועה פועל ימינה וערכו:

$$F_{EXT} = BIL = \frac{B^2 a^2 v}{R}$$

נסכם את ערכי השטף, הכא"מ והזרם המושרה בגרפים הבאים באיור 31:



איור 31: השטף המגנטי, הכא"מ המושרה, הזרם והכוח החיצוני כתלות בזמן בדוגמה 7.

9.5 גנראטורים ומנועים

היישומים החשובים של העקרונות עליהם למדנו כאן הם הגנראטור והשנאי. לא תהיה זו הגזמה לומר שיישומים אלה שינו, למעשה, את העולם: הם פתחו בפני האנושות את הדרך לשימוש נרחב באנרגיה חשמלית, שבלעדיה קשה לדמיין את החיים בימינו.

עקרון הפעולה של גנראטור מתבסס על שינוי השטף הנוצר דרך כריכותיו המסתובבות בשדה מגנטי. נתאר כאן את עקרון פעולתו. בגנראטור המתואר, מוצבות N כריכות בניצב לשדה מגנטי שעוצמתו B. אם שטח כל כריכה הוא[2] S, השטף דרך הכריכות במצב המתואר הוא מרבי, וערכו ניתן על ידי הביטוי:

$$\Phi = BS = \Phi_{max}$$

כוח חיצוני מסובב את הכריכות במהירות זוויתית קבועה ω; לכן השטף דרך הכריכות כתלות בזמן הוא ביטוי מחזורי המקיים את הקשר:

$$\Phi(t) = BS \cdot \cos(\omega t)$$

עקב הסיבוב נוצר שינוי בשטף; לכן נוצר בכריכות כא"מ מושרה שגודלו:

$$\varepsilon(t) = -n\frac{d\Phi}{dt} = -n\omega BS \cdot \sin(\omega t) = -\omega\Phi_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

ניתן לבטא את הקשר האחרון באופן הבא:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

שבו:

$$\varepsilon_{max} = N\omega BS$$

ערכו של הכא"מ המרבי תלוי בעוצמת השדה המגנטי, בתדירות הסיבוב, במספר הכריכות ובשטחן.

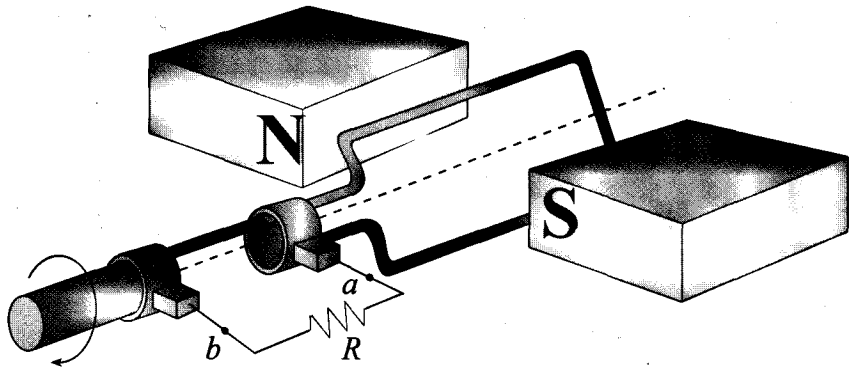
באיור 32 מתואר גנראטור בו ניתן להבחין בחיבורים העגולים עליהם מחליקים המגעים של קצות הסליל המחובר לצרכן.

באופן כללי, הזרם בגנראטור מקיים את הקשר:

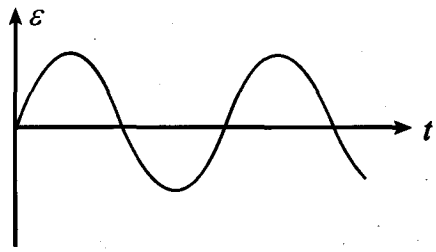
$$I(t) = \frac{\varepsilon_{max}}{R}\sin(\omega t) = I_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

---

[2] יש המסמנים את שטח הכריכה ב-"A".



איור 32: גנראטור היוצר מתח חילופין. הזרם בנגד R משנה את כיוונו לפי קצב סיבוב ציר הגנראטור.



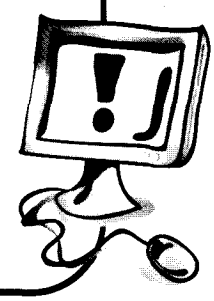
איור 33: המתח הנוצר בגנראטור הוא מחזורי, והוא מתואר על ידי הפונקציה:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

ראה הדגמה - עקרון פעולה של גנראטור היוצר "מתח חילופין".

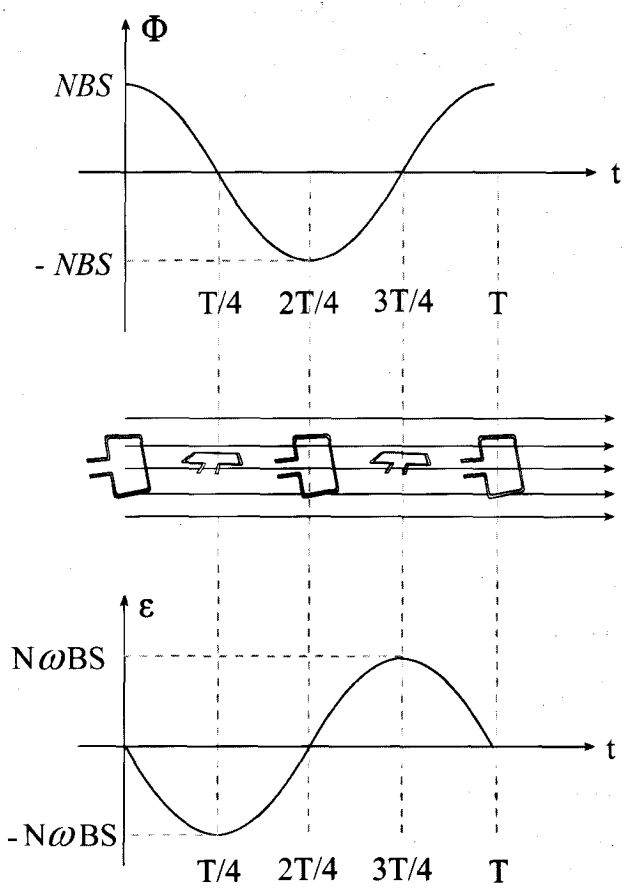
האתר: http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/ac.html

A.C. Generator Action

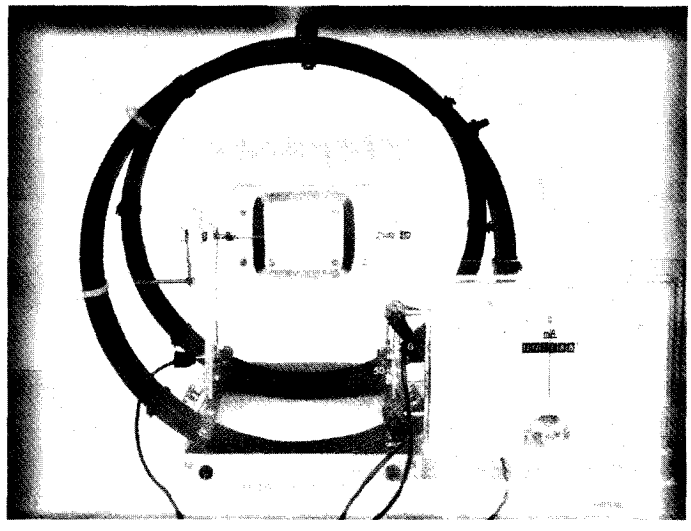


בהדמיה ניתן לשנות את תדירות סיבוב הגנראטור. שים לב, הגדלת התדירות מגדילה גם את האמפליטודה-ε_{max} של כא"מ הגנראטור.

השטף והכא"מ בגנראטור כפונקציה של הזמן מסוכמים באיור 34. יש לשים לב להפרש המופע בין הפונקציה המתארת את השטף המגנטי לבין הפונקציה המתארת את הכא"מ המושרה $\varepsilon(t)$.



איור 34: השטף, מצב הכריכה ביחס לכיוון השדה המגנטי והמתח בגנראטור



איור 35: תצלום של דגם גנראטור. הסלילים הגדולים בהם זורם זרם יוצרים שדה מגנטי.

הכא"מ המושרה נוצר בסליל הקטן המסתובב בשדה המגנטי.

המצאת הגנראטור פתחה עידן חדש בטכנולוגיה, עידן של ייצור אנרגיה חשמלית והפיכתה לנחלת הכלל. ראוי להדגיש שהגנראטורים בחברת החשמל ממירים אנרגיה כימית של סוגי דלקים שונים לאנרגיה חשמלית, ואין מדובר כמובן ביצירת אנרגיה יש מאין. בארצות בהן יש נהרות גדולים, מנצלים אנרגיה פוטנציאלית של מים לסיבוב הסלילים בגנראטורים. לעתים, גם דלק גרעיני משמש למטרה זו. השיקולים המנחים בבחירת סוג הדלק מורכבים מאספקטים כלכליים, בטיחותיים ושיקולים של שמירת איכות הסביבה. לכל אלה מתלווה גם שיקול בטחוני: טכנולוגיות הקשורות בייצור ובניצול דלק גרעיני עלולות להיות מנוצלות לרעה, לצרכים מלחמתיים.

גנראטורים עשויים לייצר גם "מתח ישר פועם", (ראה בהדמיה הבאה) שעשוי להזרים "זרם ישר פועם" במעגל חשמלי. עיקרון הפעולה של כל הגנראטורים מתבסס על שינוי השטף המגנטי דרך כריכותיו. אופי המתח שהם מייצרים (וכתוצאה מכך אופי הזרם בצרכן) תלוי, למעשה, במגעי הגנראטור המתחברים לצרכן. ישנם מכשירים שעשויים להיות מופעלים הן בזרם ישר והן בזרם חילופין. כל הצרכנים שמתפקדים כגופי חימום בתנורים, במצנמים, בקומקומים חשמליים וכדומה שייכים לקבוצה זו. לעומתם, מכשירים רבים מופעלים בזרם ישר. ניתן ליישר זרם חילופין לזרם ישר באמצעות מעגלים אלקטרוניים בהם משולבים רכיבים שונים. דיון בדרכים המאפשרות ליישר זרם חילופין לזרם ישר חורג מכוונות ספר זה.

ראה הדגייה - עקרון פעולה של גנראטור היוצר "כיתה ישר פועם".

האתר: http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/ac.html

D.C. Generator Action

שים לב למגע המפוצל המחבר את קצות הסליל לצרכן. מגע כזה הוזכר בדיון בנושא המנוע החשמלי. גם בגנראטור זה, הגדלת התדירות מגדילה גם את האמפליטודה-ε_{max} של כא"מ הגנראטור.

הדגייה נוספת: עקרון פעולה של גנראטור היוצר "כיתה ישר פועם" או "כיתה חילופין".

האתר: http://www.walter-fendt.de/ph11e/generator_e.htm

שים לב לפונקצית המתח המושרה של הגנראטור. בהדמיה ניתן לבחור בין גנראטור המייצר מתח ישר פועם או מתח חילופין, בהתאם לסוג המגעים החשמליים בסיומת הגנראטור.

9.6 שנאי (Ttansformator) והובלת אנרגיה חשמלית למרחקים

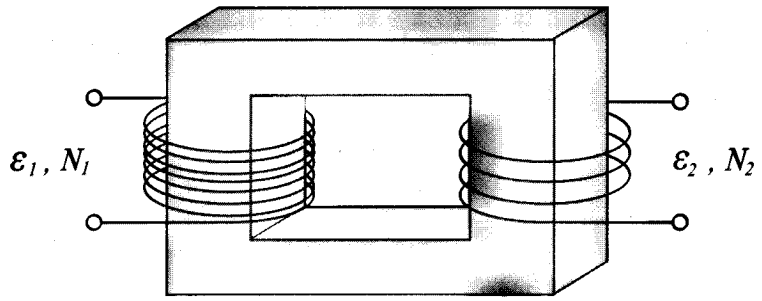
מרגע שנוצרה האנרגיה החשמלית בגנראטור יש להוביל אותה מ"תחנת הכוח" של חברת החשמל לביתו של הצרכן מרחק עשרות עד מאות קילומטרים. ההובלה כרוכה בהפסדי אנרגיה רבים עקב התחממותם של המוליכים הארוכים שמובילים את הזרם החשמלי.

אם הספק האנרגיה בחברת חשמל הוא $P = IV$, זרם שעוצמתו I שיזרום עד לבית הצרכן דרך מוליכים שהתנגדותם הכוללת R, יגרום לבזבוז הספק בשיעור I^2R. לכן כדאי להעביר את האנרגיה למרחקים בזרם נמוך ובמתח גבוה. הקטנת הזרמים מאפשרת בין היתר להקטין את עוביים של תיילי ההולכה ובכך להקטין את עלותם. המתח בקווי האספקה בין חברת החשמל לצרכן הוא בסדר גודל של $500kV$[3]. במתקנים ביתיים, מסיבות של בטיחות, המתחים כמובן נמוכים הרבה יותר, 220V באירופה, בישראל ובמדינות רבות בעולם, ובארה"ב 110V. המתקן שבאמצעותו ניתן להפוך מתח נמוך לגבוה ולהיפך נקרא "שנאי" או "טרנספורמטור".

ראוי להדגיש ששנאי הוא מתקן שמסוגל לשנות אך ורק מתח חילופין (או מתח שגודלו משתנה), ואינו מסוגל לשנות מתח קבוע בגודלו. עובדה זו היא אחד הגורמים לכך שברשתות הארציות יוצרים מתח חילופין ולא מתח ישר.

עיקרון פעולת שנאי:

שנאי עשוי מזוג סלילים מבודדים זה מזה, צמודים באמצעות ליבת ברזל.



איור 36: השנאי מכיל שני סלילים מבודדים זה מזה מלופפים **על ליבת ברזל**

שינוי בעוצמת הזרם באחד הסלילים (הסליל המחובר למקור האנרגיה מכונה סליל "ראשוני") של השנאי גורם לשינוי בעוצמת השדה המגנטי בסליל זה.

השינוי בעוצמת השדה המגנטי בסליל הראשוני גורם לשינוי בשטף המגנטי במשנהו, כך שנוצר בו (בסליל "השניוני") כא"מ מושרה. ליבת הברזל אוצרת בתוכה את קווי השדה המגנטי, ובכך יוצרת

[3] במקום שצוין מתח או זרם בסעיף זה, הכוונה לערכים אפקטיביים.

"צימוד" מגנטי יעיל בין שני הסלילים.

אם מספר הכריכות בסליל האחד הוא N_1, ומספר הכריכות בסליל השני הוא N_2, היחס בין הכא"מ ε_1 שבקצות הסליל הראשוני לכא"מ שבקצות הסליל השני - ε_2 הוא:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

קשר זה מבטא את העובדה שהיחס בין המתחים שווה ליחס בין מספרי הליפופים בסלילים.

בחברת החשמל מיוצר מתח גבוה, וסמוך לבית הצרכן מנחיתים את המתח על ידי חיבור שנאי שמספר כריכותיו בסליל הראשוני גדול ממספר כריכותיו בסליל המחובר לצרכן.

בשנאי אידיאלי[4] אין בזבוזי אנרגיה, לכן ההספק שנמסר לשנאי שווה בערכו להספק היוצא מהשנאי, ומתקיים: $\varepsilon_1 I_1 = \varepsilon_1 I_2$.

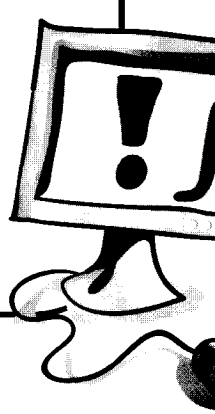
כדי ליצור מתח גבוה בסמוך ל"תחנת הכוח" של חברת חשמל השנאי, מותקן כך שהסליל הראשוני מכיל ליפופים מעטים, והסליל השניוני מכיל ליפופים רבים. מתח היציאה של השנאי יהיה גבוה, והזרם נמוך יחסית, כפי שרצוי להעביר אנרגיה חשמלית למרחקים, כדי להקטין בזבוזים במוליכים ארוכים.

ראה הדגמייה – עיקרון הפעולה של שנאי

האתר: http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transformer/index.html

" Transformer "

בהדמיה ניתן לשנות את מספר הליפופים בכל אחד מסלילי השנאי בנפרד. ההדמיה מראה את יחס המתחים בין קצות הסלילים. השווה יחס זה למספר הליפופים בסלילים.



[4] למעשה בליבת הברזל נוצרים זרמים מושרים והיא מתחממת. כדי להקטין זרמים אלה, ליבת הברזל עשויה שכבות רבות של ברזל וביניהן חוצץ חומר מבודד.

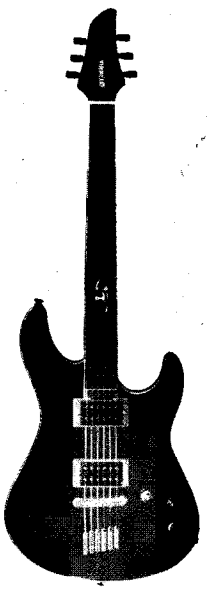
9.7 השראה מגנטית - יישומים נוספים

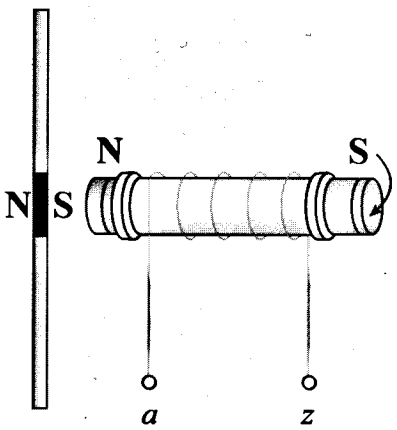
קולות, צלילים מוסיקליים ושיחזורם:

להשראה מגנטית יש תפקיד מרכזי בטכנולוגיה של שיחזור קולות וצלילים. כאשר המיתרים של גיטרה חשמלית רוטטים ומפיקים צלילים, הם למעשה, יוצרים זרמים מושרים בסליל. זרמים אלה מועברים למערכת הגברה, ומשם לרמקול שהופך זרמים לצלילים כפי שהוסבר בפרק 7.

נתמקד כאן בצלילים הנוצרים בגיטרה חשמלית:

כל גיטרה חשמלית מצוידת בשניים או שלושה סלילים הממוקמים מתחת למיתרים. סלילים אלו מכונים "pickup coils". בתוך כל סליל נמצא מגנט קבוע. השדה המגנטי של מגנט זה חודר למיתר הגיטרה, וממגנט קטע מסוים של המיתר הנמצא בקרבתו, לכן המיתר הרוטט מתפקד כמגנט צפון-דרום המתנדנד בתדירות רטט המיתר. לדוגמה, אם המיתר מנגן תו שתדירותו 440Hz (זהו תדר התו "לה", concert A) המיתר מתנהג כמו מגנט קטן מימדים המתנדנד בתדירות של 440Hz, ויוצר זרם מושרה בסליל בתדירות זו.





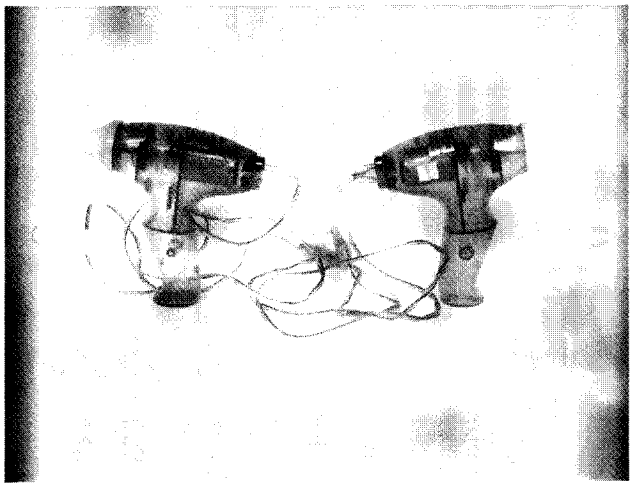
איור 37: סליל הגיטרה המכיל מגנט קבוע N-S הממגנט קטע מהמיתר. כאשר המיתר רוטט בתדירות f, נוצר זרם חילופין מושרה בסליל **בתדירות** f. קצות הסליל a,z מחוברים למגבר.

קצות הסליל מחוברים "למגבר". לאחר ההגברה הזרם מועבר לרמקול המשדר את הצלילים.

עקרון הפעולה של מיקרופון בעל סליל נייד דומה לפעולת רמקול בהיפוך תפקידים:
זרמים משתנים בסליל הרמקול יוצרים תנודות של משטח גמיש ("ממברנה") המפיק קולות וצלילים.
במיקרופון, משטח גמיש הרוטט בהשפעת צלילים וקולות ומוצמד לסליל הנמצא בשדה מגנטי יוצר זרם מושרה בסליל. זרם זה מועבר למגבר, ומשם- לרמקול.

שאלה למחשבה:

גנראטור ומנוע חשמלי יכולים להחליף תפקידים: מנוע יכול לשמש כגנראטור, ולהיפך.
רמקול ומיקרופון בעל סליל נייד יכולים אף הם להחליף תפקידים. האם זהו צירוף מקרים?

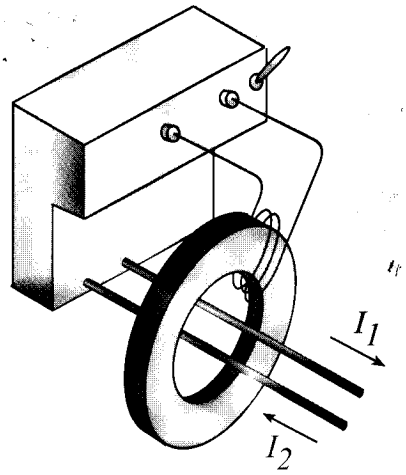


איור 38: תצלום של צמד גנראטור-מנוע מחוברים. כל אחד מהמכשירים המחוברים יכול לתפקד כגנראטור או כמנוע. כוח חיצוני מסובב את ידית **הגנראטור**, והאנרגיה מועברת **למנוע**. המפעיל מחליט מי בתפקיד הגנראטור ומי בתפקיד המנוע.

בטיחות: מפסק פחת (ground fault interrupter)

על פי התקן, בכל בית צריך להיות מותקן מפסק המנתק את הזרם במקרה של קצר, כדי למנוע סכנת התחשמלות. "התחשמלות" פירושה מעבר זרם ממכשיר לא תקין, או ממגע ישיר עם מוליך חשוף, דרך גוף האדם אל האדמה.
מפסק הפחת הוא מכשיר יעיל המנצל באופן מתוחכם את חוקי ההשראה המגנטית:
טבעת מתכת מקיפה את המוליך I_1 של זרם הכניסה לבית ואת המוליך I_2 החוזר מהבית. על טבעת זו מלופף סליל-חיישן שקצותיו מחוברים למפסק הזרם. כל עוד אין תקלה, שני הזרמים I_1 ו- I_2 שווים בגודלם והפוכים במגמתם; לכן השטף המגנטי בסליל הוא אפס. אם "דולף זרם" ממכשיר כלשהו לאדמה, שוויון הזרמים מופר, והשטף המגנטי דרך הסליל יוצר זרם בסליל. זרם זה מפעיל

אלקטרומגנט, שפותח את המתג הראשי, וגורם להפסקת הזרם בכל הבית.

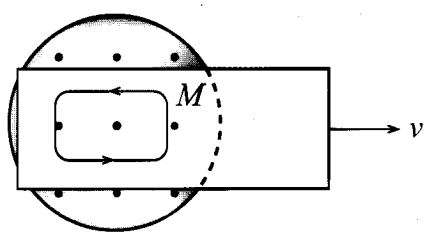


איור 39: החלקים העיקריים של מפסק פחת: טבעת מוליכה, סליל המחובר למתג הראשי.

9.8 זרמי מערבולת (Eddy Currents)

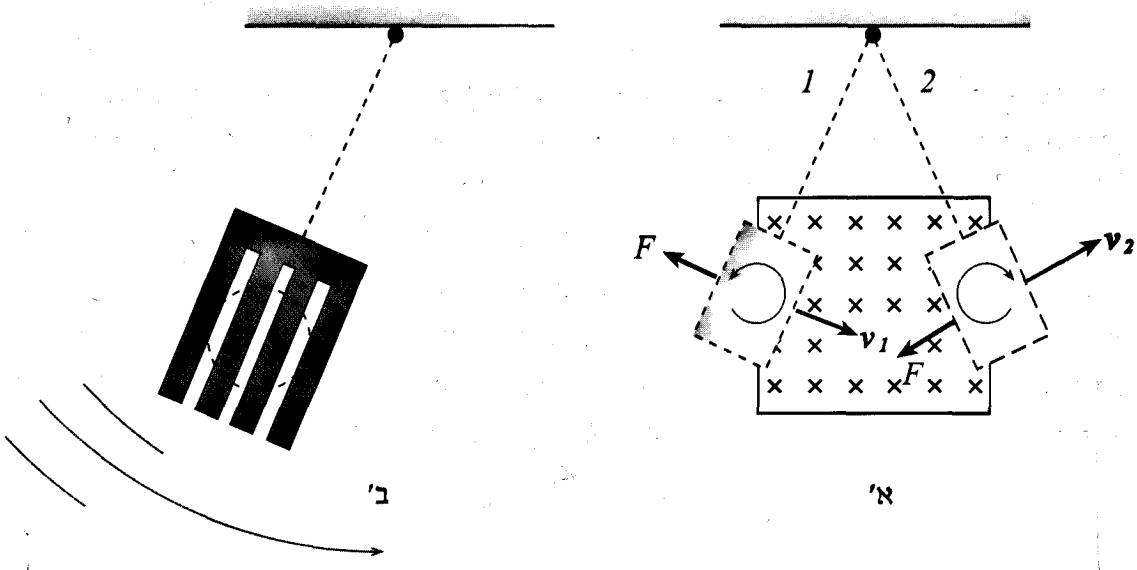
זרמי מערבולת הם זרמים שנוצרים בתוך מוליכים הנעים בתוך שדה מגנטי.

באיור 40 מתואר לוח מתכת היוצא מתוך שדה מגנטי. בכל מסלול סגור M נוצר שינוי בשטף המגנטי המעורר זרם מושרה בהתאם לחוקים שנקבעו על ידי פארדיי ולנץ. כיוון הזרם המושרה באיור הוא נגד כיוון השעון.



איור 40: זרמי מערבולת במוליך היוצא משדה מגנטי

באיור 41 בעמוד הבא מערכת הדגמה לזרמי מערבולת:
באיור א' הלוחית נבלמת כתוצאה מזרמי המערבולת.
באיור ב' מסלול זרמי המערבולת נקטע, לכן בלימת הלוחית מעטה ביותר.



איור 41 : מערכת הדגמה לזרמי מעבולת

בדרך כלל זרמים אלה אינם רצויים, הם גורמים לבזבוזי אנרגיה (למשל בשנאים), ולהתחממותם של מכשירים שונים.

יישומים של זרמי מערבולת:

למרות העובדה שזרמי המערבולת מזיקים בדרך כלל, כמה יישומים מנצלים אותם לטובה:

1. עיקרון הפעולה של גלאי מתכות:

ישנם סוגים שונים של גלאי מתכות. אחד הפשוטים מתבסס על קיומם של זרמי מערבולת: גלאי המתכות משמש לצרכים רבים, ובין היתר לאיתור מוקשים שהוטמנו באדמה. הגלאי מורכב מסליל, וממקור מתח היוצר בסליל זרם פועם, כלומר זרם בלתי רציף בתדירות של כמה פעימות בשנייה. זרם הסליל יוצר שדה מגנטי המשתנה גם הוא בתדירות פעימות זרם הסליל.

שדה זה, אם הוא מכוון לעבר מתכת, גורם להיווצרות זרמי מערבולת במתכת אשר בתורם יוצרים שדה מגנטי הפוך במגמתו ומשתנה בזמן. השדה המשתנה יוצר זרם נגדי בסליל הגלאי אותו ניתן לתרגם לחיווי של מכשיר רגיש, או- כפי שמקובל במכשירים לגילוי מוקשים - לצליל אזהרה.

ראה הדגמה: עקרון הפעולה של גלאי מתכות המתבסס על זרמי מערבולת

האתר: http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/detector/index.html

"How A Metal Detector Works"

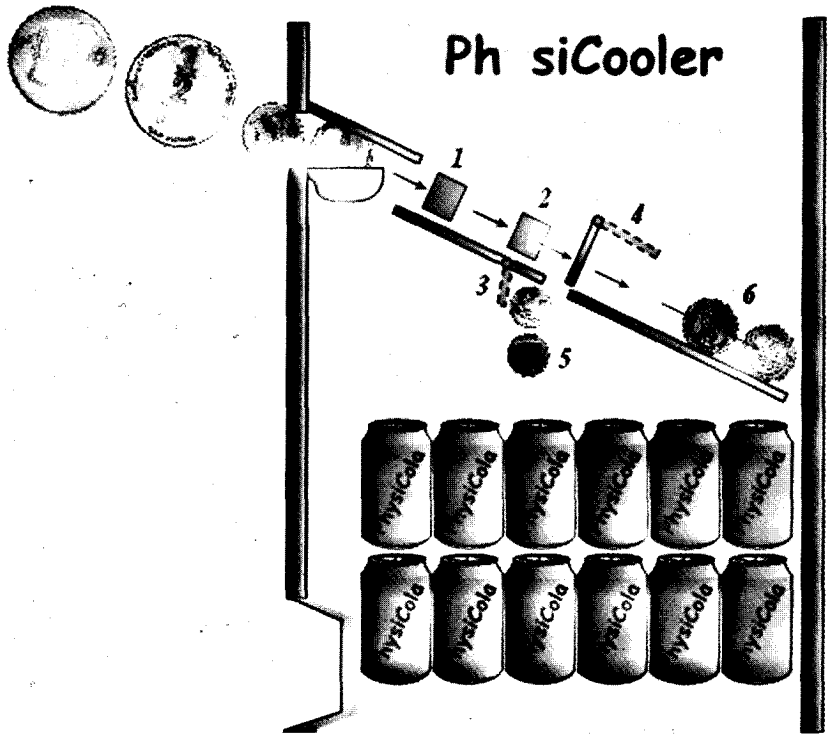
בהדמיה ניתן לראות את כיוון השדה המגנטי של סליל הגלאי, ואת זרמי המערבולת היוצרים שדה נגדי במתכת, בהתאמה עם חוק פארדיי ולנץ.

2. ריסון מאזניים מכניים רגישים:

בעת השקילה במאזניים רגישים, המסה הנשקלת נוטה להתנדנד מסביב לנקודת שיווי המשקל. לוחית מתכת המוצמדת לזרוע המאזניים נעה בין קוטבי מגנט ומרסנת את תנודות המסה, והשקילה מתבצעת ביתר קלות.

3. הבחנה בין מטבעות במכונות שתייה:

עוצמת זרמי המערבולת תלויה בסוג המתכת ובקצב שינוי השטף המגנטי. במכונות אלה המטבעות מתגלגלים על מסילה בין מגנטים קבועים המעוררים במטבעות זרמי מערבולת, ומשפיעים על מהירות התגלגלותם. חיישני מהירות (מסומנים ב-2 באיור 42) מזהים את מהירות המטבע בקצה המסילה, וגורמים לפתיחת מנוף 3 למטבע לא מתאים, או לפתיחת מנוף 4 למטבע מתאים.



איור 42: 1-מגנט הגורם לזרמי מערבולת 2-חיישן מהירות 3 ו-4 מנופים המנווטים את המטבעות לתוך המכונה או החוצה ממנה למגירת העודף.

פלזמה - מצב צבירה רביעי

מצורף כהעשרה, באדיבות ד"ר ראובן שפיטלניק, צוות חמד"ע מרכז לחינוך מדעי, ת"א

ממה מורכב היקום המוכר לנו? האם הוא עשוי מוצק, נוזל או גז? לא ולא! רוב רובו, כ-99% ממנו, קרי הגלקסיות, הצבירים ואפילו האבק בין כוכבי, מורכבים מחומר במצב צבירה שונה. ע"י חימום המוצק והתכתו, הוא עובר למצב צבירה נוזלי, המשך חימום הנוזל מעביר את מצב הצבירה לגזי, קרי לאדים. אם נמשיך ונחמם את הגז, נגיע לאותו מצב צבירה רביעי, הקרוי פלזמה[5]. זהו, ביסודו של דבר, מצב של חומר מיונן (חומר מיונן – חומר שאטומיו אינם ניטרליים, אלא בעודף או חוסר אלקטרונים, ולכן הם בעלי מטען חשמלי). על פניו, זהו נראה כמצב פשוט, ואכן, עומדים לרשותנו רוב הכלים הנדרשים לטיפול להבנה בתופעות המתרחשות בפלזמה. אך מהר מאד העניינים מסתבכים. ברגע שברצוננו לטפל בפלזמה שעל כה"א וזו שבכוכבים, אנו נתקלים בסיבוכי חישובים והבנה גדולים. אף על פי כן אנו זקוקים להבנת תופעות הפלזמה, כי הן טומנות בחובן מפתח להבנת רוב הסודות הפיזיקאליים של העולם שסביבנו. אנו נתקלים בפלזמה לא רק בחלל החיצון, אלא גם קרוב מאד אלינו. בעירת להבה, נורות פלואורסצנטיות הן תופעת הכרוכות בפלזמה. כל לייזר גזי מהסוג שמשתמים בבתי הספר (לייזרי He:Ne), מבוססים על פלזמה הנוצרת בתוכם. למעשה, כל העתיד האנרגטי של האנושות תלוי בתופעה זו. האפשרות היחידה , שיכולה לספק את צריכת האנרגיה העולמית בעתיד של אמצע המאה הזו, זהי לאו דווקא אנרגית ביקוע גרעיני, אלא להיפך, אנרגית היתוך, מיזוג של יונים קלים לאטומים כבדים יותר, תוך כדי שחרור כמות אדירה של אנרגיה (זה בדיוק התהליך שמאפשר את בעירת השמש ושמשות כמותה, כבר מיליארדי שנים).

בכנסנו לעובי הקורה של הטיפול בפלזמה , אנו מגלים עולם מורכב, קסום, שמתקיים לפי חוקיו המיוחדים והוא בהחלט שונה מעולמנו הניטרלי. כיצד נגדיר פורמאלית פלזמה? ובכן, התכונות שמגדירות פלזמה הן:

1. ***קוואזי-ניטרליות***. אומנם הפלזמה כולה מורכבת מכמות עצומה של מטענים חשמליים, אך למתבונן ולעורך מדידות מחוץ לפלזמה, נדמת הפלזמה כניטרלית (קוואזי-ניטרלית), כי בסה"כ המטענים מאזנים אלו את אלו.
2. לתוך הפלזמה לא חודר, למעשה, שדה חשמלי, והפוטנציאל החשמלי דועך מהר מאד. ניתן להגדיר מרחק אופייני לחדירת פוטנציאל לפלזמה, ***מרחק דביי*** מתוך הגדרת עומק חדירה יוני ואלקטרוני:- $\lambda_{e,i} = \sqrt{\frac{kT_{i,e}}{4\pi n_0 e^2}}$, עם המקרא הבא- $\lambda_{i,e}$ – מרחק חדירה יוני (i), מרחק חדירה אלקטרוני (e); kT- אנרגיה תרמית, המבוטאת ב-eV-ים, n_0 - צפיפות כללית של הפלזמה. מכאן

[5] פלזמה – לא לבלבל עם הפלזמה שבדם. רק המילים זהות, המשמעות שונה לחלוטין.

מרחק דביי, λ_D מוגדר כ- $\lambda_D^{-1} = \lambda_e^{-1} + \lambda_i^{-1}$. לקביעת צורת דעיכת הפוטנציאל כתלות בעומק החדירה לפלזמה, יש צורך בפתרון משוואה דיפרנציאלית, שדורשת כלים מתמטיים מעבר לאלו המצויים ברשותנו כרגע, לכן נביא כאן רק את הפתרון של דעיכת הפוטנציאל כתלות בעומק החדירה r :

$$V = \frac{q_T}{4\pi\varepsilon_0 r}\exp(\frac{-r}{\lambda_D})$$

3. כדי לקיים את כל תנאיי הפלזמה, חייבת, בין היתר, להתקיים הדרישה שבכל יחידת נפח שאורך צלעה כאורך מרחק דביי, יימצא מספר רב של יונים. סה"כ ניתן להגדיר ***פרמטר פלזמה***, Λ_D: $\Lambda_D \equiv n_0\lambda_D^3 >> 1$.

שלושת התנאים הללו מגדירים, למעשה, פלזמה. לפלזמה גם תכונות מכאניות וחשמליות מגוונות. ניתן אף להגדיר תדירות פלזמה או לטפל בגלים בפלזמה, אם שדה חשמלי או מגנטי מופעל באופן חד פעמי או מחזורי על חלק מסוים של הפלזמה. אם בהפעלה זו נוצרת הפרעה חד-פעמית או מחזורית על סוגים שונים של פלזמה, הרי שמדובר בגלים בפלזמה, שניתן לקבוע את תדירותה: $\omega_{i,e} = \sqrt{\frac{4\pi n_i Z^2 e^2}{m_{i,e}}}$. והתדר הכולל בפלזמה הדו-הרכבית זו הוא: $\omega_D^2 = \omega_e^2 + \omega_i^2$

זו, למעשה, סקירה כללית ומאד מקוצרת, רק ע"מ לתת טעם טוב וגירוי להמשך העבודה והלימוד. הבנה מעמיקה יותר דורשת התעמקות ולימוד נוספים.

לסיכום נציין, שבהבנת תהליכים המתרחשים בפלזמה, טמון, ככל הנראה, העתיד האנרגטי של כה"א.

סיכום:

- במוט הנע בשדה מגנטי, נוצר כא"מ מושרה שגודלו:

$$\varepsilon = Blv$$

- במעגל סגור כא"מ זה יוצר זרם חשמלי שעוצמתו:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{Blv}{R+r}$$

- הכוח החיצוני הדרוש כדי להניע מוט מוליך בשדה מגנטי, במהירות קבועה, v, כאשר המוט סוגר מעגל חשמלי, מבוטא בנוסחאות הבאות:

$$F_{EXT} = F_B = BIl = B\frac{Bvl}{R_T}l = \frac{B^2v l^2}{R_T}$$

- חוק פארדיי: הנגזרת של השטף המגנטי מבטא את הכא"מ המושרה.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- חוק לנץ: כיוון הזרם המושרה בכריכה הוא כך שהוא יוצר שטף מגנטי דרך הכריכה המתנגד ל**שינוי** השטף המגנטי שגרם להיווצרותו.

- בגנראטור, השטף המגנטי והכא"מ המושרה כפונקציה של הזמן, ניתנים על ידי הביטויים הבאים:

$$\Phi(t) = BS\cdot\cos(\omega t)$$

$$\varepsilon(t) = -n\frac{d\Phi}{dt} = -n\omega BS\cdot\sin(\omega t) = -\omega\Phi_{max}\cdot\sin(\omega t)$$

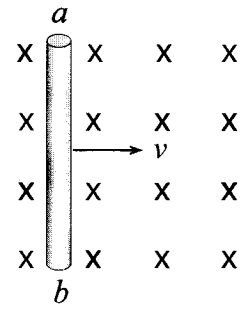
- יחס המתחים בשנאי הוא כיחס מספר הליפופים בסליליו:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

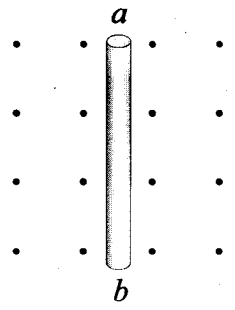
- זרמי מערבולת מעכבים את התנועה של מוליך בשדה מגנטי. בדרך כלל הם נחשבים לגורם המבזבז אנרגיה. הם הגורם העיקרי להתחממותם של שנאים.

תרגילים פרק 9

1. מוט מוליך נע ימינה בשדה מגנטי אחיד. עוצמת השדה המגנטי $B = 1.8T$, וכיוונו לתוך מישור הדף. אורך המוט $l = 0.7m$, ומהירותו $3m/s$.
   א. חשב את הכא"מ המושרה הנוצר בין קצות המוט.
   ב. איזה מקצות המוט נמצא בפוטנציאל גבוה יותר? הסבר.



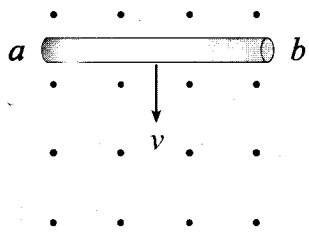
2. מוט באורך $1.2m$ עשוי מחומר מוליך נמצא בשדה מגנטי אחיד, $B = 0.3T$. חשב את הכא"מ המושרה הנוצר בין קצות a ו- b של המוט כאשר הוא נע במהירות $4m/s$ בכיוונים הבאים:
   א. ימינה.
   ב. שמאלה.
   ג. מעלה.



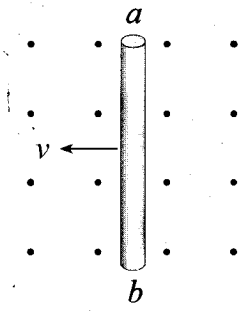
3. חשב את גודל הכא"מ המושרה בין הקצוות a ו- b של המוט הנע בשדה מגנטי אחיד באיורים א-ה, וציין בכל מקרה איזה קצה נמצא בפוטנציאל גבוה יותר.
   נתון: $B = 0.03T$, $l = 1.5m$, $v = 8m/s$.

באיורים ד' ו-ה' המוט נע אל הצופה - החוצה מהדף.

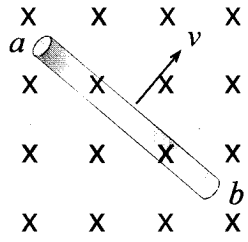
א.



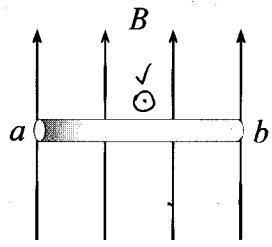
ב.



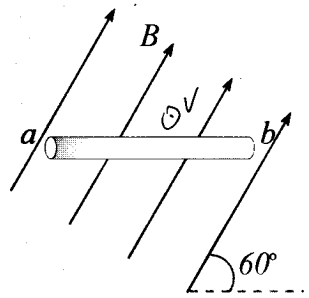
ג.



ד.

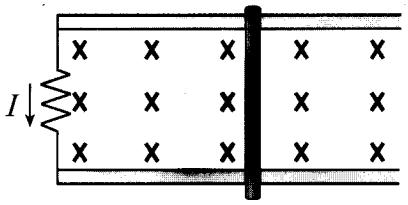


ה.



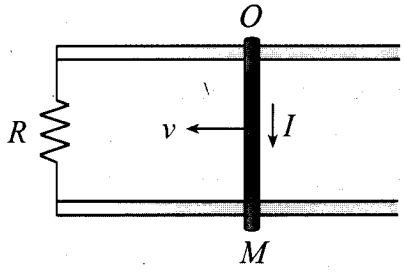
4. מוט נע במהירות $v = 8m/s$ בניצב לשדה מגנטי אחיד שעוצמתו B. הכא"מ המושרה במוט הוא 2V, ואורכו $l = 0.5m$.
מהי עוצמת השדה המגנטי האחיד בו מתרחשת תנועת המוט?

5. באיור השדה המגנטי אחיד, $B = 0.8T$, אורך המוט $l = 0.5m$, והכא"מ במוט הוא 1.2V.



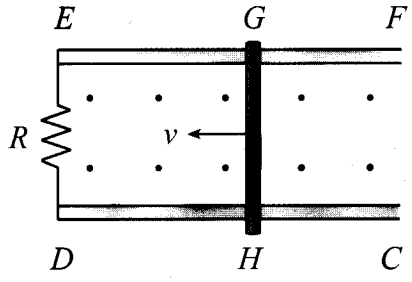
חשב את:
א. מהירות המוט.
ב. הזרם המושרה אם ההתנגדות הכוללת של המעגל החשמלי $R = 6\Omega$.
ג. הכוח שמפעיל השדה המגנטי על המוט, (גודל וכיוון).

6. מוט מוליך נע ללא חיכוך על מסילה מוליכה במהירות $v = 4m/s$, $R = 10\Omega$, והתנגדות יתר חלקי המערכת זניחה. המערכת נמצאת בשדה מגנטי אחיד שעצמתו 2T. אורך המוט $L = 0.6m$, וכיוון הזרם המושרה מ- O ל- M.



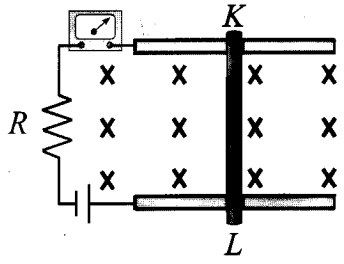
א. מהו כיוונו של השדה המגנטי?
ב. מהו גודלו ומה כיוונו של הכוח החיצוני הדרוש כדי להניע את המוט ימינה במהירות $v = 4m/s$?
ג. חשב את עבודתו של הכוח שחישבת בסעיף ב' במשך שנייה אחת.
ד. מהו הספק החום שנוצר בנגד?

7. (מסילבוס 14) מסילות EF ו-CD מחוברות ביניהן באמצעות נגד $R = 3\Omega$. מוט מתכתי GH שאורכו 12cm נע שמאלה במהירות 4m/s לאורך המסילות ללא חיכוך. המערכת המתוארת נמצאת בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.7T. התנגדות המסילות זניחה.



א. חשב את עוצמת הזרם במוט.
ב. קבע את כיוון הזרם במוט.
ג. חשב את הכוח שצריך להפעיל גורם חיצוני כדי שהמוט ינוע במהירות קבועה. מה כיוונו של כוח זה?

8. זוג מוטות מוליכים ואופקיים שהמרחק ביניהם d נמצאים בשדה מגנטי אחיד B, המאונך למישור הנוצר על ידי זוג המוטות, וכיוונו לתוך הדף. המוטות מחוברים למקור מתח ε, לנגד R ולאמפרמטר. מוט מוליך שלישי KL מונח על גבי שני המוטות. האמפרמטר אידאלי, התנגדות המוטות והחיכוך בין המוטות ניתנים להזנחה. מפעילים כוח אופקי חיצוני F על המוט כדי להחזיקו במנוחה.



א. בטא את עוצמת הזרם I בנתוני השאלה וציין את כיוונו במוט.
ב. מצא את כיוון הכוח F, ובטא את גודלו באמצעות נתוני השאלה.

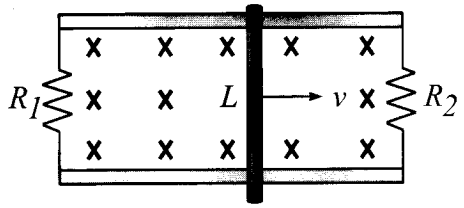
מפסיקים את פעולת הכוח החיצוני F.

ג. האם המוט KL ינוע ימינה, שמאלה או יישאר במקומו? הסבר תשובתך.

*ד. האם עוצמת הזרם I תגדל, תקטן או לא תשתנה? הסבר תשובתך.

ה. עתה מסיעים את המוט ימינה במהירות קבועה v. האם עוצמת הזרם דרך המוט תהיה גדולה או קטנה מזו שזרמה דרכו כאשר המוט הוחזק במנוחה? הסבר.

9. מוט שאורכו 0.5m נע ימינה בשדה מגנטי אחיד שכיוונו לתוך הדף. עוצמת השדה המגנטי 0.1T. מהירות המוט 2m/s, והוא נע על מסגרת מוליכה. בקצות המסגרת שני נגדים $R_1 = 2\Omega$ ו- $R_2 = 4\Omega$ כמתואר באיור.



א. חשב את הכא"מ שנוצר בין קצוות המוט.

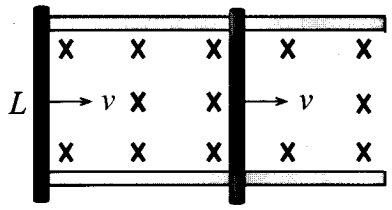
ב. חשב את הזרם בכל אחד מהנגדים. ציין את כיוון הזרמים.

ג. מה גודל הזרם במוט, ומהו כיוונו?

ד. מה גודלו ומהו כיוונו של הכוח החיצוני שפועל על המוט?

ה. שרטט מעגל שקול בו אותם נגדים כמו בשאלה, אך במקום המוט שרטט סוללה בקוטביות המתאימה. הנח שההתנגדות הפנימית של הסוללה זניחה, וכא"מ הסוללה זהה לכא"מ המתפתח במוט הנע.

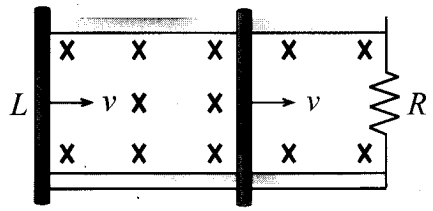
10. שני המוטות באורך L נעים ימינה במהירות זהה v, בשדה מגנטי אחיד B. המוטות והמסגרת עשויים חומר מוליך.



א. בטא את הכא"מ שנוצר בכל אחד מהמוטות.

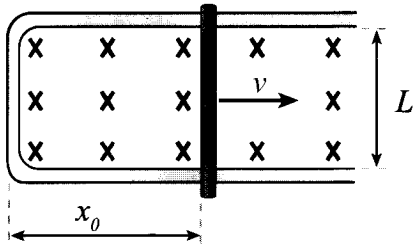
ב. האם זורם זרם במסגרת התחומה על ידי שני המוטות? הדרכה: ראה סעיף ה' בשאלה קודמת.

ג. שים לב, במעגל הבא נוסף נגד R למעגל הקודם. האם במעגל זה זורם זרם בנגד? אם כן, רשום ביטוי לזרם זה; אם לא, הסבר מדוע אין זרם.



ד. שרטט מעגל שבו המוטות מוחלפים על ידי שתי סוללות זהות. לכל סוללה כא"מ BLv, והתנגדות פנימית r. רשום ביטוי לזרם בנגד.

11. למוליך שניתנה לו צורת האות "U" יש התנגדות שסימונה "λ" ויחידותיה (Ω/m). על מוליך זה נע מוט שני, ישר חסר התנגדות בעל אורך L במהירות קבועה v. המערכת נמצאת בשדה מגנטי אחיד B מאונך למישור הדף. בזמן $t = 0$ $x = 2m$.



א. בטא את התנגדות המעגל כפונקציה של הזמן.

ב. בטא את הכא"מ במעגל.

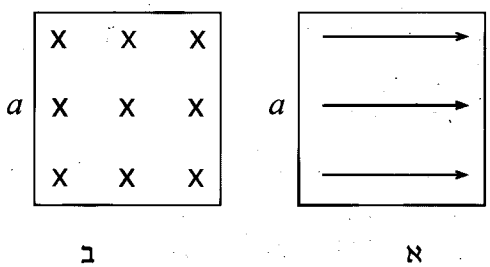
ג. בטא את עוצמת הזרם במעגל. האם עוצמת הזרם קטנה/גדלה/או קבועה במעגל?

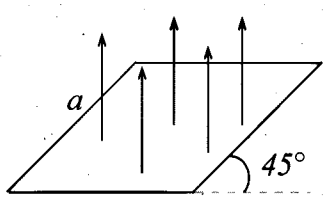
ד. מהו כיוון הזרם?

ה. איזה כוח יש להפעיל על המוט כדי לקיים את תנועתו במהירות קבועה?

ו. האם גודל הכוח קטן/גדל/או קבוע במעגל המתואר?

12. כריכה ריבועית בעלת צלע באורך a נמצאת בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו B, כמתואר באיורים. הבע את שטף המגנטי דרך הכריכה במקרים א-ג המתוארים באיורים. באיור ג', בין מישור הכריכה לבין וקטור השדה המגנטי הזווית היא 45°.

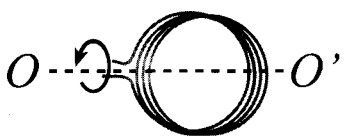




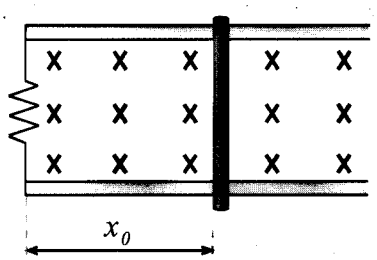
ג

13. שתי כריכות ריבועיות בהן אורך הצלעות a ו-2a ועוד שתי כריכות מעגליות בעלות רדיוס a ו- 2a נתונות בשדה מגנטי אחיד B הפונה אל הקורא (החוצה מהדף).
כל הכריכות נמצאות במישור הדף.
א. הבע את גודל השטף המגנטי Φ_0 בכל אחת מהכריכות.
ב. כיצד ישתנה ערך השטף בכל כריכה אם עוצמת השדה המגנטי תגדל פי 2? נמק.
ג. באיזו זווית יש לסובב כל כריכה, יחסית למישור הדף, כדי שהשטף המגנטי דרכה יהיה מחצית מהשטף ההתחלתי, כלומר $0.5\Phi_0$.
ד. באיזו זווית יש לסובב כל אחת מהכריכות יחסית למישור הדף, כדי שהשטף המגנטי דרכן יהיה $0.2\Phi_0$?
ה. מנה את הגורמים שקובעים את גודל השטף המגנטי דרך כריכה הנמצאת בשדה מגנטי אחיד.

14. סליל מעגלי דק מורכב מ 25 כריכות ברדיוס 12cm. הסליל נמצא בשדה מגנטי אחיד $B = 0.4T$.
א. חשב את השטף המגנטי המכסימלי דרך הסליל.
מסובבים את הסליל דרך ציר העובר דרך מרכזו, והשטף המגנטי מתאפס לראשונה תוך שתי שניות.
ב. באיזו זווית הסתובבה הכריכה במשך שתי שניות אלה ?
ג. חשב את המהירות הזוויתית של הסליל- בהנחה שהיא הייתה קבועה.

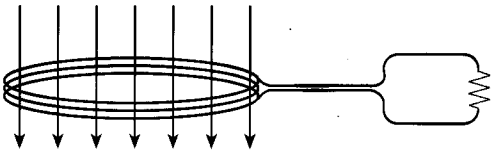


15. מוט באורך L מחליק ימינה במהירות קבועה v בניצב לשדה מגנטי אחיד B על זוג מסילות מוליכות הקשורות ביניהם באמצעות נגד. בתחילה, בזמן $t = 0$ מרחק המוט מהנגד היה x_0.



א. הבע את השטף המגנטי במסגרת הסגורה בזמן $t = 0$.
ב. הבע את השטף המגנטי כתלות בזמן.
ג. הבע את שינוי השטף $\Delta\Phi$ המגנטי בפרק הזמן שחלף בין $t = 0$ ועד זמן t.
ד. הראה ש- $\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv$
ה. באיזה תנאים נכון לחשב את המתח המושרה באמצעות הביטוי Blv?
ו. הבע את השטף המגנטי כתלות בזמן כאשר המוט מתחיל לנוע ימינה ממנוחה, מהנקודה x_0, בתאוצה קבועה a.

16. לסליל מעגלי דק המכיל 150 כריכות רדיוס 8cm. הסליל נתון בשדה מגנטי המכוון מטה, ועוצמתו 0.25T. השדה המגנטי מחליף את כיוונו, ועתה הוא מכוון מעלה. ההתנגדות השקולה של הסליל היא $r = 2\Omega$, והתנגדות הנגד $R = 4\Omega$.



א. חשב את כמות המטען שעברה בנגד בפרק הזמן שחלף כאשר השדה המגנטי החליף כיוון.

ב. מה הייתה עוצמת הזרם הממוצעת בסליל אם השדה המגנטי החליף את כיוונו במשך 0.01 שניות?

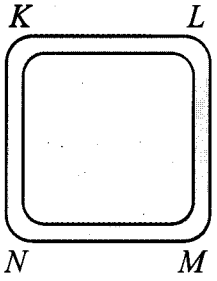
ג. כמה אנרגיה נדרשה כדי להפוך את כיוון השדה המגנטי?

17. עוצמת השדה המגנטי בקרבת כדור הארץ היא $B_E = 5\cdot10^{-5}\,T$. סליל מעגלי המכיל 2000 כריכות ברדיוס 12cm מוצב כך שמישור הסליל מקביל לעוצמת השדה המגנטי הארצי. מסובבים את הסליל כך שמישור הכריכה והשדה המגנטי מאונכים זה לזה, תוך פרק זמן $\Delta t = 0.005s$.

א. חשב את הכא"מ הממוצע שנוצר בקצות הסליל בזמן סיבובו.

ב. מה צריך להיות ערכו של Δt בנתוני השאלה כדי שבין קצות הסליל יתפתח כא"מ ממוצע של 6V?

18. באיור כריכה מלבנית KLMN הנמצאת במישור הדף. מהו כיוון הזרם המושרה בכריכה במקרים הבאים:



איור לשאלות 18-19

א. מקרבים מגנט אל הכריכה כך שהקוטב הצפוני פונה אל הדף.

ב. מרחיקים את המגנט ממישור הכריכה.

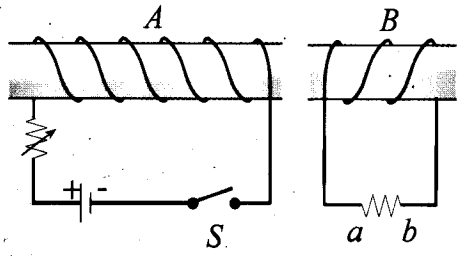
19. כריכה ריבועית שהתנגדותה $R = 0.5\Omega$ נמצאת בשדה מגנטי שגדל עם הזמן בקצב של 0.1T/s. הערך ההתחלתי של עוצמת השדה המגנטי הוא $B_0 = 0.2T$ ואורך צלע הכריכה $a = 0.4m$.

א. רשום ביטוי לעוצמת השדה המגנטי כתלות בזמן.

ב. חשב את הכא"מ המושרה בכריכה.

ג. חשב את עוצמת הזרם המושרה בכריכה.

20. העזר בחוק לנץ וקבע את כיוון הזרם המושרה דרך הנגד המחובר לסליל B במקרים הבאים:

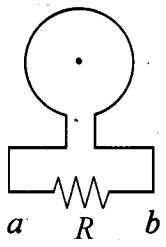


א. כאשר סוגרים את המתג.

ב. כאשר מרחיקים את הסליל B מסליל A.

ג. כשמקטינים את ערכו של הנגד המשתנה.

21. מקרבים קוטב צפוני של מוט מגנטי למישור הדף.



א. מהו כיוון הזרם המושרה בנגד?

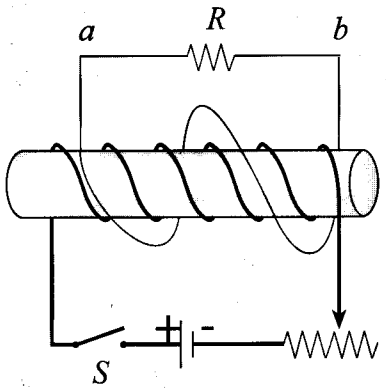
ב. האם הגודל $V_b - V_a$, המייצג את המתח בקצות הנגד, חיובי או שלילי?

22. שני תיילים מבודדים מלופפים על צינור עשוי מחומר מבודד כמתואר באיור. מהו כיוון הזרם בנגד הקבוע במקרים הבאים:

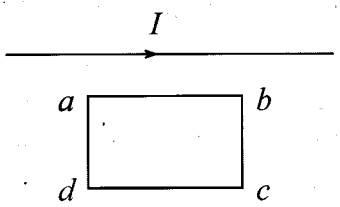
א. כאשר סוגרים את המתג.

ב. מניעים את הגרירה של הנגד המשתנה ימינה.

ג. מחליפים את הסוללה במקור מתח "חילופין" (במתח זה מתחלפת הקוטביות באופן מחזורי).



23. כריכה מלבנית מוליכה נמצאת בקרבת תייל ארוך הנושא זרם שעוצמתו I. התייל והכריכה נמצאים במישור הדף. ציין את כיוון הזרם המושרה בכריכה המלבנית במקרים הבאים:



א. מקרבים את הכריכה אל התייל.

ב. מניעים את הכריכה במקביל לתייל במהירות קבועה.

ג. הכריכה והתייל קבועים במקומם, מקטינים את עוצמת הזרם בתייל.

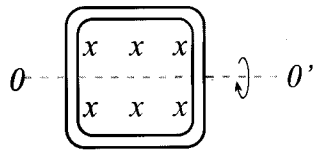
24. סליל דק מכיל 100 כריכות ריבועיות. אורך צלע כל כריכה 8cm. הסליל מסתובב סביב מרכזו בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו $B = 5\cdot10^{-2}T$. במצב המתואר, הכא"מ המושרה המכסימלי בסליל הוא 0.24V.

א. מהי תדירות סיבוב הסליל?

ב. מהו הכא"מ הממוצע בסליל?

ג. התנגדות הסליל היא 20Ω. חשב את עוצמת הזרם המרבית בסליל אם נחבר את קצותיו (הסליל "מקוצר").

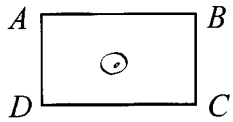
25. סליל ריבועי דק מסתובב סביב ציר העובר במרכזו בתדירות 100Hz. אורך צלע הסליל 12cm ובסליל 150 כריכות. עוצמת השדה המגנטי B = 0.25T והתנגדות הסליל 6Ω.
רשום ביטוי לכא"מ המושרה כפונקציה של הזמן במקרים הבאים:



א. ערכו של הכא"מ היה מרבי בזמן t = 0.

ב. ערכו של השטף המגנטי היה מרבי בזמן t = 0.

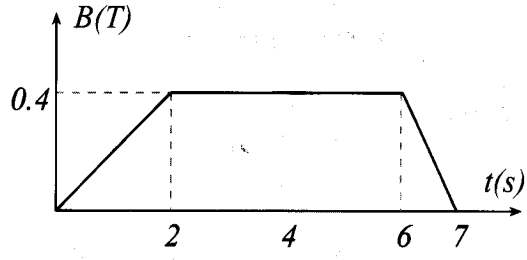
26. כריכה מלבנית שמידותיה AB = 20cm ו- BC = 10cm נתונה בשדה מגנטי שכיוונו החוצה מהדף. התנגדות הכריכה R = 0.4Ω. עוצמת השדה המגנטי מתוארת על ידי המשוואה $B = B_0 + 2\cdot10^{-3}t$. במשוואה זו $B_0 = 0.5T$, ו- t מציין זמן בשניות.



א. מהו הכא"מ המושרה בכריכה?

ב. ציין את מגמת הזרם בכריכה, וחשב את עוצמתו.

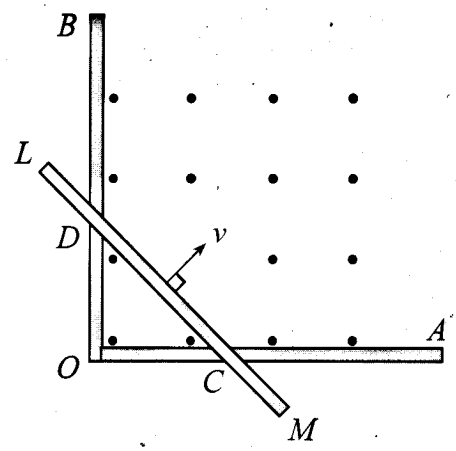
27. הכריכה בשאלה הקודמת הוכנסה לשדה מגנטי שעוצמתו מתוארת בגרף.



בזמן t = 0 כיוון השדה המגנטי היה מכוון לתוך הדף. חשב את עוצמת הזרם המושרה, וציין את כיוונו בפרקי הזמן הבאים:

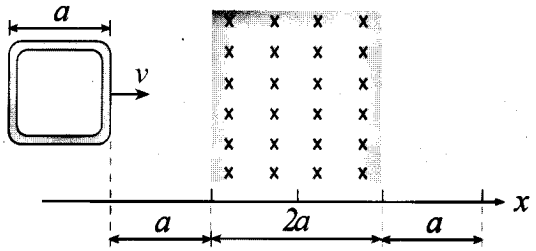
א. 0-2s
ב. 2s-6s
ג. 6s-7s

**28. תייל מוליך יוצר זווית ישרה. תייל נוסף, LM, אף הוא מוליך, מחליק על התייל הראשון בכיוון המתואר באיור, במהירות 5m/s. שני התיילים ארוכים מאוד.
משולש DOC ישר זווית ושווי שוקיים. בזמן t = 0 , OD = 3cm. המערכת נמצאת בשדה מגנטי אחיד B = 0.25T שפונה החוצה מהדף. לכל התיילים התנגדות 0.025Ω/m. שים לב, על פי היחידות ניתן להבין שזו ההתנגדות לכל מטר. רשום ביטוי לגדלים הבאים:



א. השטף המגנטי שנוצר במשולש התחום על ידי המוליכים כפונקציה של הזמן.
ב. הכא"מ כתלות בזמן.
ג. ערך התנגדות המוליכים שיוצרים מעגל חשמלי כתלות בזמן.
ד. עוצמת הזרם המושרה במוליכים .

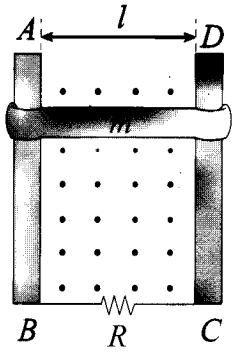
*29. שדה מגנטי B = 0.5T מכוון לתוך הדף. כריכה ריבועית בה אורך הצלע a = 0.5m נמצאת במישור הדף והיא נעה ימינה במהירות v = 0.25m/s. בזמן t = 0, מרחק הכריכה מהשדה הוא a.
שרטט בקנה מידה מתאים את הגרפים הבאים מרגע t = 0 ועד שהכריכה עוזבת לחלוטין את השדה:



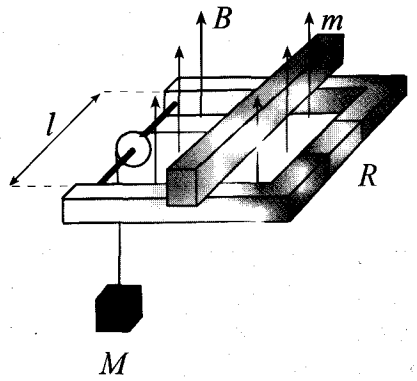
א. השטף המגנטי בכריכה כתלות בזמן.
ב. עוצמת הזרם בכריכה כתלות בזמן. בחר בזרם שכיוונו נגד כיוון מחוגי השעון כזרם חיובי.
ג. הכוח שיש להפעיל על המסגרת כדי שינוע במהירות קבועה.

30. מוט מוליך באורך l, מסה m , והתנגדות זניחה מחליק על מסגרת אנכית, מוליכה ABCD חסרת התנגדות. נגד R מחבר את תחתית המסילות. המערכת נתונה בשדה מגנטי אחיד בעוצמה B, המכוונת במקביל לקרקע, כמתואר באיור.

א. מהו כיוון הזרם המושרה במוט.
ב. מדוע המוט אינו נופל בנפילה חופשית?
ג. בטא את מהירותו המרבית של המוט באמצעות נתוני השאלה.

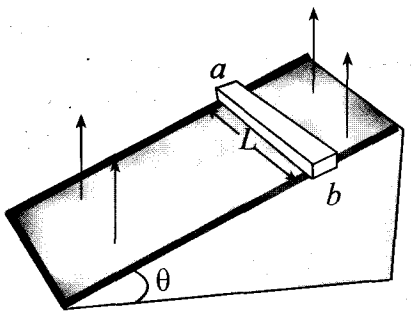


31. *קורה מוליכה אופקית שמסתה m, ואורכה l מונחת על זוג מסילות מוליכות הקשורות ביניהן בנגד R. הקורה נגררת על ידי חוט העובר מעל גלגלת אידאלית אליו קשור גוף שמסתו M. כל כוחות החיכוך ניתנים להזנחה. באזור שורר שדה מגנטי אחיד שעוצמתו B המכוון כלפי מעלה. משחררים את M ואת הקורה ממנוחה.



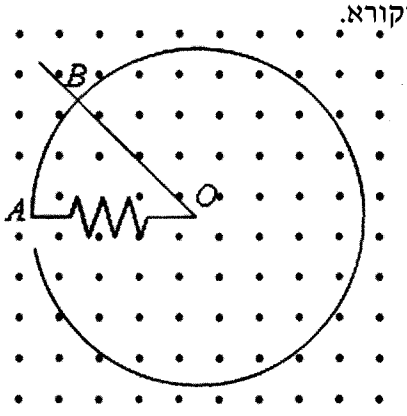
א. ציין את כיוון הזרם המושרה בנגד.
ב. תאר את תנועת המוט. בתיאורך התייחס למהירות המוט ולתאוצתו.
ג. רשום ביטוי למהירות הסופית של המוט.

32. קורה מתכתית שמסתה M, אורכה L מחליקה ממנוחה על זוג מסילות מוליכות הנטויות בזווית θ יחסית למישור האופקי. המערכת נתונה בשדה מגנטי אחיד B שכיוונו מאונך לקרקע. התנגדות הקורה R, והתנגדותן של המסילות ניתנת להזנחה.



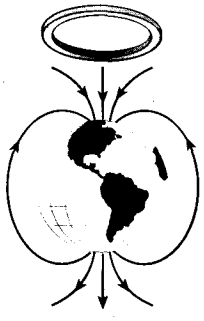
א. ציין את כיוון הזרם המושרה בקורה.
ב. בטא את המהירות המרבית של הקורה.
ג. בטא את עוצמת הזרם בקורה כאשר $v = v_{max}$.
ד. בטא את הספק החום בקורה כאשר $v = v_{max}$.
*ה. חשב את הספק עבודת כוח הכובד, והשווה עם תשובתך בסעיף ד'.

33. מוט מוליך OB מחליק על קשת מתכת ברדיוס r. המהירות הזוויתית של המוט היא ω. הנגד R מחובר למרכז המעגל O ולקצה הקשת A. המערכת המתוארת נמצאת בשדה מגנטי אחיד B הפונה אל הקורא.



א. מהו כיוון הזרם בנגד?
ב. הבע את השטף המגנטי התחום בגזרה AOB כתלות בזמן. נתון: בזמן $t = 0$ הנקודות B ו-A התלכדו.
ג. רשום ביטוי לעוצמת הזרם בנגד.
ד. בטא את כמות החום שנוצרה בנגד בפרק הזמן שהמוט החליק על פני זווית של 90°.

*34. בקוטב הצפוני השדה המגנטי מכוון מטה ועוצמתו ניתנת על ידי הביטוי $B_y = B_0 - ky$ כאשר k הוא מספר קבוע, y הוא הגובה מעל פני הארץ. משחררים טבעת מוליכה אופקית ברדיוס r מגובה H. הנח שתאוצת הנפילה החופשית קבועה, ערכה g, והתנגדות האוויר זניחה.

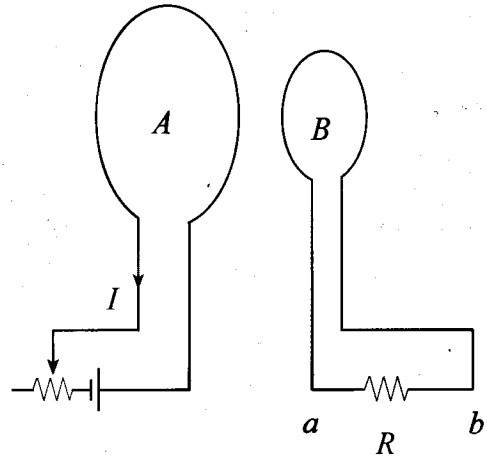


א. הבע את השטף המגנטי בטבעת כאשר חלף זמן t מרגע שחרורה.

ב. מהו כיוון הזרם המושרה בטבעת מנקודת ראותו של צופה העומד על הקרקע ומביט מעלה אל הטבעת.

ג. הבע את הכא"מ של הטבעת כתלות בזמן.

*35. המישורים של הסלילים המעגליים A ו- B מוצבים במקביל זה לזה, והם קרובים זה לזה. רדיוסי הכריכות הם $R_A = 20cm$ ו- $R_B = 3cm$, ומספרן הוא $N_A = 5$ ו- $N_B = 15$. מרכזי הסלילים נמצאים על ציר אופקי משותף. (הנח שהשדה המגנטי של סליל A אחיד סביב מרכזו, בקירוב, כך שסליל B נמצא כולו בשדה אחיד). סליל A מחובר לסוללה ולנגד משתנה-ראה איור.



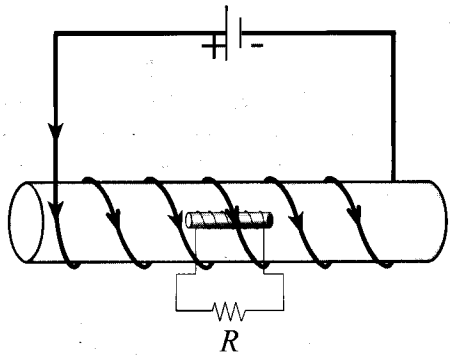
הבע את השטף המגנטי דרך סליל B כאשר עוצמת הזרם ב- A מתוארת על ידי הביטויים הבאים:

א. $I_A = 0.2 + 0.3t$

ב. $I_A = 10 - 0.4t$

ג. מהי עוצמת הזרם בנגד $R = 10^{-5}\Omega$ המחובר לסליל B במקרים א ו- ב, וציין את כיוון הזרם בנגד.

36. סילונית קטנה ובה 300 כריכות שרדיוס כל אחת מהן 0.3cm נמצאת בתוך סילונית ארוכה שבה צפיפות הליפופים היא 5000/m. לסילונית הקטנה מחובר נגד $R = 4\Omega$. עוצמת הזרם בסילונית הארוכה ניתנת על ידי הביטוי $I = 5t$.

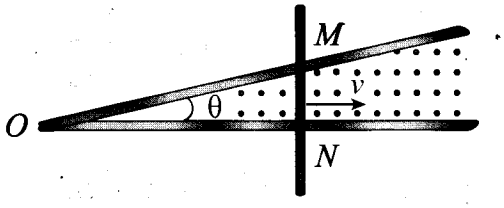


א. מהו כיוון הזרם בנגד? נמק.

ב. האם עוצמת הזרם משתנה בזמן?

ג. מהי עוצמת הזרם בנגד?

37. שתי מסילות מתכת ארוכות יוצרות ביניהן זווית θ. מוט מוליך ארוך מחליק ימינה במהירות קבועה v על המסילות. המערכת נמצאת בשדה מגנטי אחיד B הפונה החוצה מהדף. בזמן $t = 0$ המוט היה בנקודה O.



א. בטא את הכא"מ המושרה במוט כפונקציה של הזמן.

ב. המסילות והמוט עשויים מחומר שהתנגדותו ליחידת אורך היא $\lambda(\Omega/m)$. מהו כיוון הזרם במוט?

ג. בטא את עוצמת הזרם במוט כתלות בזמן.

ד. כדי שהמוט ינוע ימינה במהירות קבועה יש להפעיל עליו כוח F. האם כוח זה הולך וקטן, אינו משתנה, או הולך וגדל עם הזמן? נמק תשובתך.

38. לעתים מעל מיטתו של חולה נמצא צג המראה נתונים שונים על מצבו הפיזיולוגי, ובין היתר מראה את קצב נשימתו. חיישן קצב הנשימה הוא סליל מוליך גמיש העוטף את חזה החולה. בכל

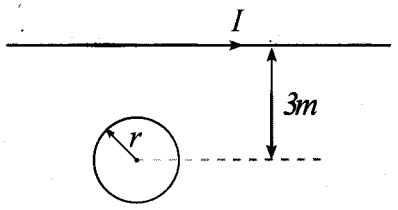
נשימה מתרחב הסליל בכ - $35cm^2$.
בסליל 200 כריכות, ועוצמת השדה המגנטי של הארץ היא $B = 4\cdot10^{-5}T$.
הנח שהזווית בין עוצמת השדה לבין מישור הכריכה היא 25°.
בהנחה שנשימה (שאיפת האוויר) נמשכת כ-1.5 שניות, חשב את הכא"מ המושרה הממוצע שנוצר בסליל.

39. תלמיד החליט לבנות גנראטור מסליל דק המסתובב בשדה המגנטי של כדור הארץ. עוצמת השדה המגנטי של הארץ היא $B = 4\cdot10^{-5}T$.

א. בהנחה שמספר כריכות הסליל הוא 1000, וכי התלמיד מסוגל לסובב את הסליל סביב צירו בתדירות 50Hz, (באמצעות מערכת גלגלות) מה צריך להיות שטח הכריכות כדי ליצור כא"מ מרבי של 6V בקצות הסליל?

ב. מהו במקרה זה הרדיוס של כריכה בודדת בסליל?

40. יש דבר כזה חשמל חינם?
תלמיד הציע לבנות "גנראטור נייח" המנצל את השדה המגנטי המשתנה בזמן סביב קווים של מתח גבוה. התלמיד בנה סליל שטוח המכיל 1000 ליפופים, ברדיוס $r = 0.4m$, והציב את הסליל במרחק 3m מתחת לקו מתח גבוה. עוצמת הזרם בקו המתח ניתנת על ידי הביטוי $I = 300\sin(2\pi ft)$, כאשר $f = 50Hz$, הזמן t נמדד בשניות, ועוצמת הזרם I נמדדת באמפר.



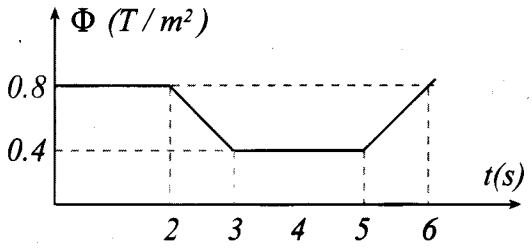
א. בטא את השטף המגנטי דרך הסליל כפונקציה של הזמן (בהנחה שעוצמת השדה זהה בכל שטח הסליל לעוצמת השדה במרכזו).

ב. בטא את המתח בקצוות הסליל, וציין את ערכו המרבי.

ג. מחברים את קצות הסליל באמצעות נגד R. בטא את הספק החום שנוצר בנגד כפונקציה של הזמן.

ד. בעיה מוסרית קטנה... האם זו אנרגיה "יש מאין", או: מי, למעשה, משלם עבור אנרגיה זו, אם בכלל ? פרט תשובתך.

41. כריכה מלבנית שאורך צלעותיה הוא $a = 30cm$ ו- $b = 20cm$ מונחת בשדה מגנטי, בניצב לכיוון עוצמת השדה. השטף המגנטי דרך הכריכה מתואר בגרף. התנגדות הכריכה היא 0.2Ω.



א. מהי עוצמת השדה המגנטי בזמן $t = 4s$?

ב. מהי עוצמת השדה המגנטי בזמן $t = 2.5s$?

ג. חשב את עוצמת הזרם בכריכה בפרקי הזמן הבאים:
1) 0-2s
2) 2s-3s
3) 3s-5s
4) 5s-6s

תשובות לפרק 9

1 א. 3.78V
ב. $V_a > V_b$
2. א. 1.44V
ב. 1.44V
ג. 0
3. א. 0.36V
V_a
ב. 0.36V
V_a
ג. 0.36V
V_a
ד. 0.36V
V_a
ה. 0.312V
V_a
4. 0.5T
5. א. 3m/s
ב. 0.2A
ג. 0.08N נגד כיוון
תנועת המוט
6. א. לתוך הדף
ב. 0.576N שמאלה
ג. 2.3J
ד. 2.3W
7. א. 0.112A
ב. מעלה
ג. $9.41\cdot10^{-3}$N שמאלה
8. א. ε/R מעלה
ב. $B\varepsilon d/R$ ימינה
ג. שמאלה
ד. תקטן
ה. תגדל
9. א. 0.1V
ב. 0.05A
0.025A
ג. 0.075A למעלה
ד. $3.75\cdot10^{-3}$N ימינה

10. א. BLv
ב. לא
ג. BLv/R
ד. BLv/(R+0.5r)
11. א. $\lambda L + 2\lambda(2+vt)$
ב. BLv
ג. $\dfrac{BLv}{\lambda L + 2\lambda(2+vt)}$
ה. $\dfrac{B^2L^2v}{\lambda(L+4+2vt)}$
ימינה
12. א. 0
ב. Ba^2
ג. $0.71Ba^2$
13. א. Ba^2
$4Ba^2$
$B\pi a^2$
$4B\pi a^2$
ב. $2\Phi_0$
ג. 60°
ד. 78.46°
14. א. 0.45Wb
ב. 90°
ג. $025\pi = 0.78$rad
15. א. BLx_0
ב. $BL(x_0+vt)$
ג. $BLvt$
ו. $BL\left(x_0+\dfrac{at^2}{2}\right)$
16. א. 0.251C
ב. 25.1A
ג. 37.8J
17. א. 0.905V
ב. $7.54\cdot10^{-4}$s
19. א. $B = 0.2 + 0.1t$

ב. $1.6\cdot10^{-2}$V
ג. $3.2\cdot10^{-2}$A
20. א. שמאלה
ב. ימינה
ג. שמאלה
21. א. מ – a ל – b
ב. שלילי
23. א. נגד כיוון השעון
ב. אין זרם
ג. עם כיוון השעון
24. א. 1.19Hz
ב. 0
ג. $1.2\cdot10^{-2}$A
25. א. $108\pi\cdot\cos(200\pi t)$
ב. $108\pi\cdot\sin(200\pi t)$
26. א. $4\cdot10^{-5}$V
ב. 10^{-4}A עם כיוון
השעון
27. א. 10^{-2}A נגד כיוון
השעון
ב. 0
ג. $2\cdot10^{-2}$A עם כיוון
השעון
30. א. שמאלה
ג. $\dfrac{mgR}{B^2l^2}$
31. א. אל הצופה
ג. $\dfrac{mgR}{B^2l^2}$
32. א. מ – b ל – a
ב. $\dfrac{RMg\cdot\tan\theta}{B^2L^2}$
ג. $\dfrac{Mg\cdot\tan\theta}{BL}$
ד. $\dfrac{RM^2g^2\cdot\sin^2\theta}{B^2L^2}$
33. א. מ – O ל – A
ב. $\dfrac{Br^2\omega t}{2}$

ג. $\frac{Br^2\omega}{2R}$

ד. $\frac{B^2r^4\pi\omega}{8R}$

34. א.

$$\pi r^2\left(B_0 - kH + \frac{gt^2}{2}\right)$$

ב. בכיוון השעון

ג. $\pi r^2 kgt$

36. א. ימינה

ב. לא

ג. $2.66\cdot10^{-2}A$

37. א. $Bv^2(\tan\theta)t$

ג. מ – M ל – N

38. $3.94\cdot10^{-8}V$

39. א. $0.477m^2$

ב. 0.39m

40. א. $3.16\cdot\sin(100\pi t)$

ב. $316\pi\cdot\cos(100\pi t)$

$316\pi\ V = 992.74V$

41. א. 6.67T

ב. 10T

ג-1. 0

ג-2. 2A

ג-3. 0

ג-4. -2A